

Радіоастрономічний інститут
Національна академія наук України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Єрін Сергій Миколайович

УДК 520.27:523:98:524.354.4

ДИСЕРТАЦІЯ
«НИЗЬКОЧАСТОТНЕ КОСМІЧНЕ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ
ЯК ОБ'ЄКТ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИМ
РАДІОТЕЛЕСКОПОМ НОВОГО ПОКОЛІННЯ»

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія
фізико-математичні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

С. М. Єрін
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:
Токарський Петро Львович, доктор фізико-математичних наук,
професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Єрін С. М. Низькочастотне космічне радіовипромінювання як об'єкт спостереження ширококутовим радіотелескопом нового покоління. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – «астрофізика, радіоастрономія». – Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Низькочастотна радіоастрономія дає можливість отримувати унікальні знання про Всесвіт за допомогою радіохвиль частотою 8–100 МГц. Низькочастотне радіовипромінювання таких об'єктів як Сонце, Юпітер і пульсари несе у собі інформацію про механізми його генерації, параметри середовища виникнення випромінювання та його поширення від джерела до спостерігача. Різноманітні типи спорадичного випромінювання Сонця й Юпітера, через їх характер, потребують постійних моніторингових спостережень з високим частотно-часовим розділенням. Деякі типи цього випромінювання досі не мають моделей їх генерації. Радіовипромінювання пульсарів на низьких частотах є мало дослідженим, а ефекти впливу середовища поширення у цьому діапазоні проявляються найбільш сильно. Аналіз такого випромінювання на великих часових масштабах може дати нові знання про параметри та властивості міжзоряного середовища.

Низькочастотні радіотелескопи у якості сенсорів використовують антенні решітки, які, зазвичай, мають дуже великі фізичні розміри. Досягнення аналогової та цифрової електроніки, обчислювальної техніки, техніки та теорії антен призвели до появи нового покоління низькочастотних радіотелескопів, значно збільшивши їхню чутливість та інформативність даних, що отримуються за їх допомогою. У антенних решітках радіотелескопів нового покоління використовуються активні антени,

малошумні підсилювачі сигналів та цифрові методи формування променю ДН. Це дало можливість значно зменшити вартість створення нового інструменту, розширити смугу частот, розширити динамічний діапазон, підвищити завадостійкість та інформативність спостережень у порівнянні з радіотелескопами минулого покоління.

Найвідомішими з радіотелескопів нового покоління є LOFAR (Європейський Союз), LWA (США), NenuFAR (Франція), SKA (міжнародний проект) та український радіотелескоп ГУРТ. Антенні решітки сучасних великих низькочастотних радіотелескопів складаються з багатьох ідентичних невеликих субрешіток, що мають в своєму складі від 19 до 256 активних антенних елементів. Сигнали з цих елементів або одразу ж потрапляють на АЦП (LOFAR, LWA), або аналоговим способом фазуються та додаються у субрешітці, і вже на її виході потрапляють на АЦП. Перший підхід є більш гнучким, але має суттєві обмеження через великий потік цифрових даних, який поки що неможливо обробити ментально. Другий підхід дозволяє більш оптимально використовувати обчислювальні ресурси, однак має обмеження по ментальній області видимості антенної решітки.

Через складність, великі фізичні розміри, велику вартість побудови та експлуатації, кількість низькочастотних радіотелескопів у світі мала, а час спостережень є дуже обмеженим ресурсом. Будівництво таких радіотелескопів займає значний проміжок часу, при цьому потенціал готових субрешіток ще до завершення будівництва можна використати для вирішення певних астрофізичних задач. В літературі зустрічаються описання та результати деяких експериментів за допомогою субрешіток, але немає систематизованих даних з характеристик таких субрешіток та задач які можна вирішувати з їх допомогою. Малі радіотелескопи природньо використовувалися на початку радіоастрономічних досліджень, але сучасні технології та підходи до проектування значно збільшили їхню чутливість і можливості.

Оцінити можливості субрешітки для радіоастрономічних досліджень можна теоретично на основі даних з її чутливості та типовим густинам потоків радіовипромінювання космічних джерел, але найкращою демонстрацією таких оцінок є реальні спостереження та дослідження, що виконані за допомогою існуючої субрешітки радіотелескопа.

Таким чином, *дисертація присвячена* дослідженням низькочастотного радіовипромінювання галактичного фону, спорадичного випромінювання Сонця й Юпітера, а також, імпульсного випромінювання пульсарів за допомогою малого ширококутового радіотелескопа нового покоління – субрешітки ГУРТ.

В роботі розроблено модель активної антени, що використовується як елемент антенної решітки радіотелескопа ГУРТ, а також, на її основі розроблено модель субрешітки ГУРТ з 25 активних елементів. Коректність моделей було підтверджено порівнянням результатів моделювання з результатами натурних вимірювань шумових параметрів реальних пристроїв – активної антени та субрешітки ГУРТ.

Проведено чисельне моделювання основних параметрів активної антени та субрешітки. У результаті моделювання отримано залежності ефективної площі, чутливості системи (у термінах System equivalent flux density та Sky noise dominance), внесків шумових температур від різних джерел шуму у вихідний сигнал у широкому діапазоні частот та для всіх напрямків головного променя антенної решітки. Результати моделювання, зокрема, показали ефективність використання щільної антенної решітки у якості сенсору низькочастотного радіотелескопа, адже взаємні зв'язки у решітці дають можливість краще узгодити вхідні опори диполя і антенного підсилювача на низьких частотах, і, відповідно, розширити смугу його робочих частот.

На основі характеристик субрешітки, отриманих в результаті моделювання, проведено оцінку чутливості субрешітки для приймання і дослідження різних типів космічного радіовипромінювання на низьких

частотах. Висунуто додаткові критерії ідентифікації спорадичного та імпульсного радіовипромінювання, які дають можливість використовувати малі низькочастотні радіотелескопи для їхнього дослідження.

Для підтвердження можливостей ефективних радіоастрономічних досліджень проведені реальні спостереження за допомогою одного антенного елемента та субрешітки ГУРТ. Результати спостережень довели ефективність і стабільність характеристик систем ГУРТ, а також наочно показали можливості реєстрації різних типів випромінювання. Проведено довготривалі спостереження добової зміни галактичного фону для видимої ділянки неба за допомогою активної антени та субрешітки ГУРТ. Спостереження показали чутливість систем до галактичного фонового випромінювання, а також свідчать про високу стабільність параметрів систем.

При спостереженнях активного Сонця було детектовано сплески типів II, III, IIIb, IV, U, дрейфуюча пара. Сплески типу дрейфуюча пара було вперше детектовано лише за допомогою однієї активної антени, що свідчить про великий потенціал її використання, зокрема у радіотелескопах космічного базування. Реєстрація цих сплесків дала можливість доповнити статистику періодичності їх появи, а також визначити параметри плазми у сонячній короні.

Спостереження декаметрового радіовипромінювання Юпітера проводилися за допомогою субрешітки ГУРТ в тому числі в межах наземної підтримки космічної місії Juno. Впевнено зареєстровано випромінювання S та L типів з часовим розділенням до 10 мс. Результати спостережень поляризованого випромінювання Юпітера продемонстрували можливості дослідження поляризованого космічного радіовипромінювання за допомогою антенних елементів двох ортогональних поляризацій.

Проведено огляд відомих пульсарів за допомогою субрешітки ГУРТ у діапазоні частот 30–70 МГц з часом накопичення сигналу до 4 годин. Зареєстровано імпульсне радіовипромінювання 16 пульсарів, визначені їх густини потоків та міри дисперсії. Розроблена та випробувана методика

спільних спостережень пульсарів у надширокому діапазоні частот одночасно на радіотелескопі УТР-2 та субрешітці ГУРТ. Для контролю впливу іоносферної рефракції на результати вимірювання густин потоків на найнижчих частотах спостережень запропоновано використовувати не тільки радіотелескоп УТР-2 у повній конфігурації, а і його окремі секції. Такий підхід дає можливість відслідковувати дані викривлені рефракцією і не враховувати їх при подальшій обробці. Проведено дві пробні тижневі сесії спостережень пульсарів B1133+16, B1508+55, B1919+21 з метою реєстрації змінності густин потоків та мір дисперсії. Результати обробки даних показали змінність видимих густин потоків, але зафіксувати варіації мір дисперсії не вдалося.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше виявлено тонку частотно-часову структуру сплесків спорадичного радіовипромінювання Сонця та Юпітера різних типів завдяки унікальним характеристикам низькочастотного малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ – надширокій смузі частот (8–80 МГц), високому розділенню у часі (5...100 мс) та частоті (9 кГц).

2. Вперше одночасно на декаметрових і метрових хвилях зареєстровано імпульсне радіовипромінювання 16 пульсарів, визначено їх густини потоків та з високою точністю (0.006 пк/см³) виміряні їх міри дисперсії, що доводить унікальну можливість довготривалого моніторингу неоднорідностей міжзоряного середовища із використанням малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ та радіотелескопа УТР-2.

3. Доведено можливість проведення якісних астрофізичних досліджень за допомогою низькочастотних малорозмірних радіотелескопів нового покоління шляхом визначення параметрів континуального, імпульсного, спорадичного, поляризованого космічного радіовипромінювання різноманітних об'єктів Всесвіту (Сонця, планет, міжпланетного і міжзоряного середовища, залишків наднових, пульсарів, радіогалактик, тощо).

4. Вперше детально досліджено параметри субрешітки низькочастотного радіотелескопа нового покоління ГУРТ, зокрема її чутливість, у надширокому діапазоні частот 8–80 МГц із використанням розробленої для неї коректної математичної моделі, яка на відміну від існуючих, бере до уваги всі джерела зовнішніх і внутрішніх шумів з урахуванням впливу ґрунту та взаємних зв'язків між елементами. Коректність моделі підтверджено відповідністю результатів моделювання та проведених натурних вимірювань. Їх результати доводять, що розроблена субрешітка забезпечує перевищення зовнішнього шуму над внутрішнім у 6–10 дБ для всіх її променів, що цілком задовольняє вимогам щодо її застосування для радіоастрономічних спостережень і астрофізичних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при проектуванні нових низькочастотних радіотелескопів та чутливих антен різних застосувань. За результатами дисертаційної роботи отримано нові знання про особливості радіовипромінювання пульсарів у діапазонах декаметрових і метрових хвиль. Результати дисертаційної роботи демонструють значні можливості для астрофізичних досліджень навіть на окремих невеликих субрешітках радіотелескопів.

Ключові слова: Сонце, Юпітер, пульсари, радіовипромінювання, радіотелескоп, активна антена, антенна решітка, чутливість, ГУРТ.

ABSTRACT

Yerin S. M. Low-frequency cosmic radio emission as an object of observations with wideband radio telescope of new generation. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for the Candidate of Science degree in Physics and Mathematics, specialization 01.03.02 «Astrophysics, radio astronomy». – Institute of Radio astronomy of NAS of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

Low-frequency radio astronomy allows obtaining unique facts about our Universe using radio waves of 8–100 MHz frequency. Low-frequency emission of Sun, Jupiter and pulsars contains information about emission generation mechanisms, parameters of media where the emission is generated and propagate from the source to observer. Various types of Solar and Jovian sporadic emission require continuous monitoring observations with high frequency and time resolutions. Some types of such emissions till now do not have clear physical models of their generation. Pulsar radio emission at low-frequencies is very poor studied and the effects of propagation media in this range are the most prominent. Analysis of such emission at long time scales can reveal new facts on parameters and properties of interstellar medium.

Low-frequency radio telescopes use antenna arrays of large physical dimensions as sensors for radio waves. The progress of analog and digital electronics, computers, antenna theory and techniques resulted in construction of new generation of low-frequency radio telescopes and dramatic increasing of their sensitivity and information value of their data. In antenna arrays of radio telescopes of new generation active antennas, low-noise signal amplifiers and digital methods of beamforming are used. It allows dramatic reduction of new instrument construction cost, extension of the frequency band and dynamic range, increase the RFI immunity and information content of observations in compare to radio telescopes of previous generation.

The most known project of new generation radio telescopes are LOFAR (European Union), LWA (USA), NenuFAR (France), SKA (global international project) and Ukrainian radio telescope GURT. Antenna arrays of modern large low-frequency radio telescopes consist of many identical subarrays, which include 19–256 active antennas. Signals from these antennas directly come to ADC (LOFAR, LWA) or in analog way are phased and added in a subarray, and then digitized at its output. The first approach is more flexible but has substantial limitations due to high digital data rate, which now is not possible to process instantly. The second approach allows more optimal using of computational resources, but has limitations in simultaneous field of view of the antenna array.

Due to complexity, large physical dimensions, high construction and operation cost the number of low-frequency radio telescopes in the world is small and the observation time is very limited resource. Construction of such radio telescopes takes much time and the potential of completed subarrays till the end of construction process can be used for addressing particular astrophysical problems. One can find descriptions and results of some experiments made with subarrays in the literature but there is no systematic information on the characteristics of such subarrays and problems that can be solved with their using. Small radio telescopes naturally were used in the beginning of radio astronomy studies, but cutting edge technologies and approaches to research and development increased significantly their sensitivity and capabilities.

It is possible to estimate capabilities of the subarray for radio astronomy studies on the basis of its sensitivity and typical radio emission flux densities of cosmic sources, but the best demonstration of such estimates are the results of real observations and studies done with existing radio telescope subarray.

Therefore, *the thesis presents* the studies of low-frequency radio emission of galactic background, sporadic emission of Sun and Jupiter, and pulsed radio emission of pulsars using small wideband radio telescope of new generation – GURT subarray.

In the work the model of active antenna which is used as an element of GURT radio telescope antenna array, was developed. On the basis of this model there was developed a model of entire subarray of 25 active antennas. The correctness of these models was proven with comparison of GURT active antenna and subarray noise parameters modeling and measurements results.

A numerical modeling of main active antenna and the subarray was done. The results of modeling include frequency dependences of effective area, system sensitivity in terms of system equivalent flux density and sky noise dominance, contribution of noise temperatures from various noise sources to output signal in a wide frequency range and for all possible main beam directions of the subarray. The results of modeling among other show the effectiveness of using dense antenna array as a sensor of a radio telescope due to mutual coupling in the subarray, which allow better matching of input impedances of dipole and amplifier at low frequencies and widening its operating frequency range.

On the basis of subarray characteristics obtained as a result of modeling we have estimated the sensitivity of the subarray for receiving and studying of various types of cosmic radio emissions at low frequencies. New additional criteria for identification of sporadic and pulsed radio emission are proposed. These criteria allow using small radio telescopes for study of such emissions.

In order to prove the possibility of efficient radio astronomy studies we have done real observations using single active antenna and GURT subarray. The results of observations proved the effectiveness and stability of the GURT systems and clearly shown the capabilities of various types emission registration. A long-term observations of diurnal change of galactic background emission for the observable part of the sky using active antenna and GURT subarray. The observations have shown the sensitivity of the systems for galactic background emission and high stability of the whole system parameters.

During active Sun observations we have detected types II, III, IIIb, IV, U and drifting pair bursts. The drifting pair bursts were detected for the first time using only single active antenna, which shows its good potential, for example for

using in space-based radio telescope. Registration of such bursts allowed complementing the statistics of their generation and determine the parameters of plasma in solar corona.

Jupiter decameter radio emission observations with GURT subarray were carried out in the frame of Juno space mission ground support. The S- and L-bursts were registered with the resolution of 10 ms. The observations of strongly polarized Jupiter radio emission proved the possibilities of polarized cosmic radio emission studies using antenna elements of two orthogonal polarizations.

A survey of known pulsars using GURT subarray was carried out in the frequency range 30–70 MHz with time averaging up to 4 hours. A pulsed emission of 16 pulsars was registered, flux densities and dispersion measures were determined for these pulsars. We have developed and tested a technique of joint observations of pulsars in ultra wide frequency band simultaneously at UTR-2 radio telescope and GURT subarray. To control the effect of ionosphere refraction on the results of flux densities measurements at the lowers observing frequencies it was suggested to use not only the full configuration of UTR-2 radio telescope but its separate subarrays as well. Such workaround allows tracing data spoiled by the refraction and do not take them into account in further processing. A trial two weekly observation sessions for pulsars B1133+16, B1508+55, and B1919+21 in order to register the variability of their flux densities and dispersion measures. The results of data processing demonstrated the variability of visible flux densities but the dispersion measures variations were not found.

Scientific novelty of obtained results.

1. For the first time a fine time-frequency structure Solar and Jupiter sporadic radio emission bursts of various types thanks to unique parameters of low-frequency small-sized radio telescope – GURT subarray – ultra wide frequency band (8–80 MHz), high resolution in time (5...100 ms) and frequency (9 kHz).

2. For the first time simultaneously at decameter and meter wavelengths the pulsed radio emission of 16 pulsars was registered. For these pulsars their flux

densities were estimated and with high accuracy (0.006 pc/cm^3) their dispersion measures were determined, that proves the unique capability of long-term monitoring of interstellar media inhomogeneity using small-sized radio telescope – GURT subarray and UTR-2 radio telescope.

3. A capability of making efficient astrophysical studies using low-frequency small-sized radio telescopes of new generation is proven by determining the parameters of continuum, pulsed, sporadic, polarized cosmic radio emission of various sources of the Universe (Sun, planets, interplanetary and interstellar media, supernova remnants, pulsars, radio galaxies, etc.)

4. For the first time the parameters of low-frequency radio telescope of new generation – GURT subarray are studied in detail, namely its sensitivity in ultra wide frequency range 8–80 MHz. A correct mathematical model has been developed, which, unlike existing models, takes into account all sources of external and internal noise, the effect of the near ground surface, and the mutual coupling of the array elements. The correctness of the model is confirmed with conformity of modelling and measurements results. The results prove that the developed subarray ensures the sky noise dominance of 6–10 dB for all beams, that completely satisfies the requirements for its application for radio astronomy observations and astrophysical studies.

The practical significance of the work. The results of this work can be used for research and development of new low-frequency radio telescopes and sensitive antennas of various applications. A new knowledge on the features of pulsars radio emission in decameter and meter wave ranges was obtained. The results of the work demonstrate substantial capabilities for astrophysical studies even with single small-sized radio telescope subarrays.

Key words: Sun, Jupiter, pulsars, radio emission, radio telescopes, active antenna, antenna array, sensitivity, GURT.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Бубнов И. Н., Гридин А. А., Шевчук Н. В., Фалькович И. С., Коваль А. А., Руткевич Б. П., Резник А. П., Рукер Х. О., Панченко М., Белов А. С., Христенко А. Д., Квасов Г. В., **Ерин С. Н.** Наблюдения солнечного U-всплеска в полосе частот 10–70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18. № 2. С. 101–106. (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на субрешиці радіотелескопа ГУРТ).
2. **Ерин С. Н.**, Токарский П. Л., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Резник А. П. Диаграммообразующий модуль для секции антенной решетки радиотелескопа ГУРТ декаметрового и метрового диапазонов волн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19. № 3. С. 240–248. DOI: 10.15407/rpra19.03.240 (Особистий внесок здобувача: проведення вимірювань характеристик діаграмотворного модуля, обробка отриманих даних, написання тексту статті).
3. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.** Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20. № 2. С. 142–153. DOI: 10.15407/rpra20.02.142 (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання антенної решітки, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання тексту статті).
4. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21. № 1. С. 48–57. DOI: 10.15407/rpra21.01.048 (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, вимірювання шумових характеристик антенного элемента, обробка даних, написання тексту статті).

5. Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21. №. 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083 (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на субрешітках радіотелескопа ГУРТ, обробка даних, створення програм візуалізації і обробки даних, написання тексту статті).
6. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н.. Шумовая температура активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23. № 1. С. 43–59. DOI: 10.15407/rpra23.01.043 (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання структури субрешітки, проведення вимірювань шумових характеристик антенної решітки, обробка даних, створенні програм обробки даних, написання тексту статті).
7. Захаренко В. В., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н., Васильева Я. Ю., Ульянов О. М., Яцына В. Ю. Исследования радиоизлучения пульсаров с помощью секции радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. Т. 23. №. 3. С. 147–165. DOI: 10.15407/rpra23.03.147 (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешітках радіотелескопа ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання тексту статті).

Наукові праці в зарубіжних наукових фахових виданнях:

8. Tokarsky P., Konovalenko A., **Yerin S.** Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65. Is. 9. P. 4636–4644. DOI: 10.1109/TAP.2017.2730238 (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, вимірювання шумових характеристик субреши́тки ГУРТ, написання тексту статті*).
9. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Mutual coupling between antennas used as elements of a phased antenna array for the decametric wave radio telescope. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75. No. 4. P. 285–295. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у створенні програм обробки даних, написання тексту статті*).
10. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovsky V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., **Yerin S.**, Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Experimental Astronomy*. 2016. Vol. 42. Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та*

субреши́тках ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту статті).

11. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V., Bubnov I., **Yerin S.**, Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasytkivskyi Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2016. Vol. 05. Is. 04. P. 1641010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2251171716410105> (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субреши́тках ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту статті).*

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ
МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ
(ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ НА НАУКОВИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ)**

12. Konovalenko A. A., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** The directivity characteristics of an antenna array receiving the UWB signal. Proc. of the Vth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'10), Sevastopol, Ukraine, 2010, P. 249–251. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті).*

13. **Yerin S. N.**, Gridin A. A., Tokarsky P. L. Phase shifter for antenna array of decameter range radio telescope. Proc. of the 19th Intern. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012, Warsaw, Poland, 2012, P. 715–717. (*Особистий внесок здобувача: проведення вимірювань характеристик фазообертачів, участь у розробці моделі, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті*).
14. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Gridin A. A., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** UWB active antenna array for low frequency radio astronomy. Proc. of the VIth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), Sevastopol, Ukraine, 2012, P. 39–43. (*Особистий внесок здобувача: участь у моделюванні характеристик субрешилки ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту конференційної статті*).
15. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Matrix approach to estimation of phased antenna array efficiency placed near air-ground interface. Proc. of the 12-th Kharkiv young scientists conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2012), Kharkiv, Ukraine, 2012. (*Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у написанні тексту конференційної статті*).
16. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Mutual coupling between antennas used as array elements of a low frequency radio telescope. Proc. of the Intern. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), Odesa, Ukraine, 2013, pp. 269–272. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у написанні тексту статті*).
17. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** A multiport approach to modelling of phased antenna array for radio astronomy. Proc. of 43rd European Microwave Conference (EuMC 2013), Nuremberg, Germany, 2013, P. 1651–1654. (*Особистий внесок здобувача: участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту конференційної статті*).

18. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Potential characteristics of subarray with discrete phase shifters for phased antenna array of GURT radio telescope. Proc. of 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC 2013), Kharkiv, Ukraine, 2013. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, участь в написанні тексту тез доповіді*).
19. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope. Proc. of the VIIth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14), Kharkiv, Ukraine, 2014, P. 25–29. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті*).
20. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Accurate analysis of subarray characteristics for GURT low-frequency radio telescope. Proc. of the 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014), Kharkiv, Ukraine, 2014. (*Особистий внесок здобувача: участь у розробці моделі та методики розрахунків, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті*).
21. Konovalenko A., Zarka P., Sodin L., Zakharenko V., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Stanislavsky A., Kalinichenko N., Koliadin V., Melnik V., Dorovsky V., Shepelev V., Koval A., Bubnov I., **Yerin S.**, Vasylieva I., Gridin A., Kulishenko V., Reznik A., Reznichenko A., Kvasov G., Mukha D., Khristenko A., Litvinenko G., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Ryabov V., Mann G., Brazhenko A., Koshovyy V. State-of-the-art of low frequency radio astronomy, relevant antenna systems and international cooperation in Ukraine. Proc. of the Xth International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), Kharkiv, Ukraine, 2015, P. 8–12. (*Особистий внесок здобувача: підготовка*

допоміжних матеріалів та ілюстрацій, участь в написанні тексту конференційної статті).

22. **Yerin S. N.**, Konovalenko A. A., Khristenko A. D., Gridin A. A., Reznik A. P., Kvasov G. V. Signal delivery system in a subarray of Giant Ukrainian Radio Telescope. Proc. of the Xth International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), Kharkiv, Ukraine, 2015, P. 190–192. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні вимірювань характеристик субреши́тки ГУРТ, обробка даних, написання тексту конференційної статті).*
23. Konovalenko A., Zarka P., Rucker H. O., Mann G., Zakharenko V., Ulyanov O., Melnik V., Kalinichenko N., Panchenko M., Stanislavskiy A., Litvinenko G., Sidorchuk M., Stepkin S., Kolyadin V., Tokarskiy P., **Yerin S.**, Bubnov I., Brazhenko A. Multi-telescope synergy in the low-frequency radio astronomy for the solar, planetary and heliospheric studies. U.R.S.I. Landesausschuss in der Bundesrepublik Deutschland e.V. Kleinheubacher Tagung 2015 Miltenberg, Germany, 2015. *(Особистий внесок здобувача: участь у спостереженнях на радіотелескопі УТР-2 та ГУРТ, участь у підготовці доповіді).*
24. **Yerin S.**, Tokarsky P., Bubnov I., Konovalenko A. Variation of phasing system parameters of GURT active antenna subarray in a wide scan range. Proc. of International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2015), Dnipropetrovsk, Ukraine, 2015, P. RAA-1. *(Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у написанні тексту конференційної статті).*
25. Zakharenko V., **Yerin S.**, Bubnov I., Vasilieva I., Kravtsov I. Using of pulsar spectra catalogue at frequencies below 80 MHz for astronomical calibration of phased antenna arrays. Proc. of International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF 2016), Kharkiv, Ukraine, 2016, P. RAA-5. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на*

радіотелескопі УТР-2 та субрешітці ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання тексту статті).

26. Cecconi B., Zarka P., Savalle R., Le Sidaner P., Coffre A., Denis L., Viou C., Konovalenko A. A., Skoryk A., **Yerin S.**, Kasaba Y., Kumamoto A., Misawa H., Tsuchiya T., Hobara Y., Nakajo T., Imai K., Ryabov V., Rothkaehl H., Orton G. S., Momary T., Griessmeier J.-M., Imai M., Girard J. N., Lamy L., Anderson M., André N., Génot V., Ebert R., Carozzi T., Kimura T., Kurth W. S., Higgins C. A., Mugler J. L., Typinsky D., Clarke T., Sky J., Flagg R., Reyes F., Greenman W., Brown J., Mount A., Ashcraft T., Thieman J., Reeve W., Fung S., Towne N., King T., Bolton S. Juno-ground-radio observation support. Proc. of 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII), Graz, Austria, October 25–27, 2016. P. 28. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешітці ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки та бази даних спостережень).*
27. Konovalenko A., Tokarsky P., Bubnov I., **Yerin S.** SNRs of two active antenna designs: Inverted V vs horizontal dipole. Proc. of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kyiv, Ukraine, 2017. P. 224-227. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972627. *(Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, участь у обробці даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту конференційної статті).*
28. Konovalenko A., Tokarsky P., **Yerin S.** Effect of the ground screen on sensitivity of low-frequency radio telescope array element. Proc. of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, 2017. P. 186–189. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972617 *(Особистий внесок здобувача: участь у обробці даних, участь у створенні програм обробки, участь в написанні тексту конференційної статті).*

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ | 24 |
| ВСТУП | 25 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ) | 33 |
| 1.1. Огляд радіотелескопів нового покоління | 34 |
| 1.1.1. LOFAR | 34 |
| 1.1.2. LWA | 41 |
| 1.1.3. NenuFAR | 46 |
| 1.1.4. SKA – AAVSO.5 | 47 |
| 1.2. Радіотелескоп ГУРТ | 49 |
| 1.3. Застосування малих радіотелескопів для розв’язання астрофізичних задач | 57 |
| 1.3. Визначення чутливості субрешіток НЧ радіотелескопів нового покоління | 58 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 | 60 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СУБРЕШІТКИ АФАР ГУРТ | 61 |
| 2.1. Постановка задачі | 61 |
| 2.2. Математична модель активної антени, що використовується як елемент субрешітки АФАР ГУРТ | 65 |
| 2.3. Математична модель субрешітки | 69 |

| | |
|--|-----|
| 2.4. Визначення шумової температури системи та чутливості елементів НЧ радіотелескопа | 79 |
| 2.5. Числовий аналіз параметрів активного елемента АФАР ГУРТ | 83 |
| 2.6. Числовий аналіз шумової температури субрешітки АФАР ГУРТ | 87 |
| 2.7. Зіставлення результатів розрахунку та експерименту для елемента АФАР ГУРТ | 93 |
| 2.8. Зіставлення результатів розрахунку та експерименту для АФАР ГУРТ | 96 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 | 104 |
| РОЗДІЛ 3. РАДІОАСТРОНОМІЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОРОЗМІРНИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ | 106 |
| 3.1. Флуктуаційна чутливість як основна оцінка можливостей спостережень малорозмірних низькочастотних радіотелескопів | 107 |
| 3.2. Дослідження чутливості елементів радіотелескопа ГУРТ за допомогою спостережень добової зміни фонового радіовипромінювання Галактики | 110 |
| 3.3. Детектування різноманітних типів сонячних сплесків як свідчення високої чутливості складових елементів радіотелескопа ГУРТ | 115 |
| 3.3.1. Спостереження сплесків типів II, III, IIIb, IV | 115 |
| 3.3.2. Спостереження сплеску U-типу | 120 |
| 3.3.3. Спостереження сплесків типу «дрейфуюча пара» | 123 |

| | |
|---|-----|
| 3.3. Детектування L та S типів сплесків декаметрового радіовипромінювання Юпітера | 127 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 | 131 |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СУБРЕШІТКИ РАДІОТЕЛЕСКОПА ГУРТ | 133 |
| 4.1. Оцінка можливості реєстрації радіовипромінювання пульсарів за допомогою субрешітки радіотелескопа ГУРТ | 135 |
| 4.2. Детектування радіовипромінювання пульсарів з використанням субрешітки ГУРТ | 139 |
| 4.3. Одночасні спостереження пульсарів на різних радіотелескопах суміжних діапазонів..... | 148 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4 | 158 |
| ВИСНОВКИ..... | 159 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 161 |
| ДОДАТКИ..... | 175 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|---------|--|
| АФАР | Активна фазована антенна решітка |
| АЦП | Аналого-цифровий перетворювач |
| БП | Багатополюсник |
| ГУРТ | Гігантський український радіотелескоп |
| ДМ | Діаграмоутворювальний модуль |
| ДН | Діаграма направленості |
| ДС | Діаграмоутворювальна схема |
| КВМ | Корональний викид мас |
| КНД | Коефіцієнт направленої дії |
| КП | Коефіцієнт підсилення |
| МШП | Малошумний підсилювач |
| НЧ | Низькочастотний |
| РІ НАНУ | Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України |
| С/Ш | Сигнал/шум |
| УРАН | Український інтерферометр академії наук |
| УТР-2 | Український Т-подібний радіотелескоп другої модифікації |
| ФАР | Фазована антенна решітка |
| ADR | Advanced digital receiver |
| HBA | High-band array |
| LBA | Low-band array |
| LOFAR | Low Frequency Array |
| LWA | Long wavelength array |
| NenuFAR | New Extension in Nançay Upgrading LOFAR |
| SKA | Square kilometer array |
| SND | Sky noise dominance |
| SEFD | System equivalent flux density |

ВСТУП

Актуальність теми. Низькочастотна радіоастрономія (8–100 МГц) переживає етап бурхливого розвитку, оскільки вона робить суттєвий внесок у розуміння фізичних процесів, що відбуваються у Всесвіті. В багатьох країнах в останні 10–15 років з'являються проекти НЧ радіотелескопів нового покоління. Серед них є глобальні проекти, такі як LOFAR та SKA, а також більш локальні, як LWA1, NenuFAR та ГУРТ. Зазвичай антенні системи таких радіотелескопів являють собою великоапертурні фазовані антенні решітки (ФАР), які складаються з багатьох ідентичних частин – субрешіток. Проекти великих радіотелескопів дуже коштовні і потребують багато часу (іноді десятки років) для їх реалізації, тому є сенс уводити їх в дію поступово, використовуючи для досліджень їх побудовані частини, не чекаючи повної імплементації всього проекту. Наочним прикладом може бути радіотелескоп LWA1, що є частиною великого проекту LWA, який ще не завершено, або міжнародні станції LOFAR, які частину робочого часу можуть працювати автономно від своєї глобальної мережі, даючи змогу працюючим на них дослідникам розв'язувати свої локальні задачі. Низькочастотне радіовипромінювання таких об'єктів як Сонце, Юпітер і пульсари несе у собі інформацію про механізми його генерації, параметри середовища виникнення випромінювання та його поширення від джерела до спостерігача. Різноманітні типи спорадичного випромінювання Сонця й Юпітера через їх характер потребують постійних моніторингових спостережень з високим частотно-часовим розділенням. Деякі типи цього випромінювання досі не мають моделей їх генерації. Радіовипромінювання пульсарів на низьких частотах є мало дослідженим, а ефекти впливу середовища поширення у цьому діапазоні проявляються найбільш сильно. Аналіз такого випромінювання на великих часових масштабах може дати нові знання про параметри та властивості міжзоряного середовища.

Радіотелескоп ГУРТ належить до тих проектів, реалізація яких розтягнулася на довгі роки. Він так само складається з окремих субрешіток, кількість яких у перспективі має сягнути сотні. Оскільки будівництво ГУРТ, на жаль, йде повільно, прийнято слухне рішення вводити у дію кожну чергову субрешітку одразу після її побудови і оснащення необхідною електронікою. З уводом у експлуатацію перших субрешіток ГУРТ, який припав на кінець 2010 року і збігся з початком роботи над дисертацією, з'явилася низка актуальних задач, що потребували негайного розв'язання. До них слід віднести всебічне теоретичне дослідження параметрів субрешітки, зокрема її чутливості, підтвердження теоретичних результатів шляхом натурного експерименту, а також проведення на ній перших радіоастрономічних спостережень, що доводили можливість її використання для дослідження Всесвіту.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження різнотипного космічного випромінювання із використанням субрешітки ГУРТ як автономного малого широкосмугового низькочастотного радіотелескопа нового покоління.

Для досягнення поставленої мети треба було вирішити наступні задачі:

1. Детально дослідити параметри, зокрема чутливість, малого НЧ радіотелескопа, створеного на базі одної субрешітки ФАР ГУРТ, задля визначення його придатності для виконання різноманітних радіоастрономічних спостережень.

2. Дослідити добові та довготривалі зміни фонового радіовипромінювання Північного неба шляхом його спостереження з використанням субрешітки ФАР ГУРТ задля експериментальної перевірки її чутливості.

3. Провести спостереження різних видів спорадичного радіовипромінювання потужних космічних джерел, зокрема Сонця і Юпітера, з метою оцінки можливості їх дослідження з використанням субрешітки ФАР ГУРТ.

4. Виконати огляд пульсарів у смузі частот 30–70 МГц за допомогою субрешітки ГУРТ заради оцінки можливості її залучення для дослідження параметрів імпульсного радіовипромінювання пульсарів і властивостей міжзоряного середовища.

Об'єктом дослідження є спорадичне, континуальне й імпульсне електромагнітне випромінювання позаземних радіоджерел.

Предметом дослідження є частотно-часові властивості випромінювання космічних сигналів різного походження.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження часової та частотної структури низькочастотного радіовипромінювання космічних об'єктів виконано з використанням методів радіоастрономічних спостережень, що добре себе зарекомендували на радіотелескопах УТР-2 і УРАН. Обробка результатів спостережень і очищення їх від завад проводилась з використанням відомих методів спектральної та статистичної обробки експериментальних даних. Теоретичні дослідження параметрів субрешітки ГУРТ виконувались із використанням методів електродинамічного комп'ютерного моделювання, теорії рівноважних флуктуаційних процесів в електродинамічних системах, та методів числового аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше виявлено тонку частотно-часову структуру сплесків спорадичного радіовипромінювання Сонця й Юпітера різних типів завдяки унікальним характеристикам низькочастотного малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ – надширокій смузі частот (8–80 МГц), високому розділенню у часі (5...100 мс) та частоті (9 кГц).

2. Вперше одночасно на декаметрових і метрових хвилях зареєстровано імпульсне радіовипромінювання 16 пульсарів, визначено їх густини потоків та з високою точністю (0.006 пк/см³) виміряні їх міри дисперсії, що доводить унікальну можливість довготривалого моніторингу неоднорідностей

міжзоряного середовища із використанням малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ і радіотелескопа УТР-2.

3. Доведено можливість проведення якісних астрофізичних досліджень за допомогою низькочастотних малорозмірних радіотелескопів нового покоління шляхом визначення параметрів континуального, імпульсного, спорадичного, поляризованого космічного радіовипромінювання різноманітних об'єктів Всесвіту (Сонця, планет, міжпланетного і міжзоряного середовища, залишків наднових, пульсарів, радіогалактик, тощо).

4. Вперше детально досліджено параметри субрешітки низькочастотного радіотелескопа нового покоління ГУРТ, зокрема її чутливість, у надширокому діапазоні частот 8–80 МГц із використанням розробленої для неї коректної математичної моделі, яка на відміну від існуючих, бере до уваги всі джерела зовнішніх і внутрішніх шумів з урахуванням впливу ґрунту та взаємних зв'язків між елементами. Коректність моделі підтверджено відповідністю результатів моделювання та проведених натурних вимірювань. Їх результати доводять, що розроблена субрешітка забезпечує перевищення зовнішнього шуму над внутрішнім у 6–10 дБ для всіх її променів, що цілком задовольняє вимогам щодо її застосування для радіоастрономічних спостережень і астрофізичних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами дисертаційної роботи отримано нові знання про особливості радіовипромінювання пульсарів у діапазонах декаметрових і метрових хвиль. Результати дисертаційної роботи демонструють значні можливості для астрофізичних досліджень навіть на окремих невеликих субрешітках радіотелескопів. Також результати дисертаційної роботи можуть бути використані при проектуванні нових низькочастотних радіотелескопів та чутливих антен різних застосувань.

Особистий внесок автора полягає у розробці та практичній реалізації моделей активної антени та субрешітки ГУРТ, а також, методики розрахунку енергетичних і шумових параметрів антенного елементу та субрешітки ГУРТ, підготовці, проведенні й обробці результатів натурних вимірювань шумових параметрів елемента та субрешітки, в активному зборі й аналізі літературних даних за темою дисертації. Автор, в тому числі й самостійно, проводив радіоастрономічні спостереження, що описані у дисертації, також розробив програми аналізу та візуалізації даних спостережень отриманих за допомогою приймачів ADR радіотелескопа ГУРТ та результатів їхньої обробки на мові програмування Python 3. Аналіз й обробка експериментальних даних отриманих за допомогою радіоастрономічних спостережень на радіотелескопах УТР-2 та ГУРТ були проведені особисто автором. Автором було розроблено й апробовано методику довготривалих спостережень і обробки даних радіовипромінювання пульсарів на радіотелескопах УТР-2 та ГУРТ. Автор брав участь у постановці задач, аналізі, обговоренні й узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків. Також внесок автора полягає в підготовці матеріалів для публікацій за темою досліджень, підготовці доповідей і представлення результатів роботи на конференціях і семінарах.

Апробація матеріалів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-кваліфікаційних семінарах, а також на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2010), Sevastopol, Ukraine, 2010;
- 19th Intern. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012, Warsaw, Poland, 2012;
- 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2012), Sevastopol, Ukraine, 2012;
- 12th Kharkiv young scientists conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2012), Kharkiv, Ukraine, 2012;

- International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), Odesa, Ukraine, 2013;
- 43rd European Microwave Conference (EuMC 2013), Nuremberg, Germany, 2013;
- 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC 2013), Kharkiv, Ukraine, 2013;
- 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2014), Kharkiv, Ukraine, 2014;
- 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014), Kharkiv, Ukraine, 2014;
- 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), Kharkiv, Ukraine,
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2015), Dnipropetrovsk, Ukraine, 2015;
- European Radar Conference (EuRAD), 2015 European Microwave Week, Paris, France, 2015;
- U.R.S.I. Landesausschuss in der Bundesrepublik Deutschland e.V. Kleinheubacher Tagung 2015 Miltenberg, Germany, 2015;
- International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF 2016), Kharkiv, Ukraine, 2016;
- VIIIth Intern. Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'16), Odesa, Ukraine, 2016;
- 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII), Graz, Austria, October 25–27, 2016;
- 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, 2017;
- European Planetary Science Congress 2017, Riga, Latvia, 2017;

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Загальний обсяг роботи складає 182 сторінок. Вона містить 64 рисунки, 2 таблиці та список використаних джерел зі 140 найменувань на 13 сторінках.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі Низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України та є складовою частиною наступних проектів (здобувач – виконавець):

- «Розробка, впровадження і використання додаткових систем гігантського українського радіотелескопа УТР-2 – ГУРТ» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-13, № держ. реєстрації 0113U002653) 2013 р;
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр: ФАВОРИТ-3, № держ. реєстрації 0113U002048) 2013 р;
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-14, № держ. реєстрації 0114U002823) 2014 р;
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-15, № держ. реєстрації 0115U004084) 2015 р;
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-16, № держ. реєстрації 0116U00) 2016 р.;
- «Пошук та вивчення грозових розрядів в атмосферах планет за допомогою найбільших радіотелескопів декаметрового діапазону довжин хвиль» (шифр: БЛИСКАВКА, № держ. реєстрації 0115U004377) 2016 р.;
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр: ФАВОРИТ-4, № держ. реєстрації 0116U002159) ;

- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП -17, № держ. реєстрації 0117U002394) ;
- «Створення математичної моделі великих фазованих антенних решіток та її застосування для калібрування радіотелескопа УТР-2» (шифр: ЕТАЛОН, № держ. реєстрації 0117U006277) ;
- «Радіовипромінювання Всесвіту у декаметровому діапазоні хвиль» (шифр: КОФР-3, № держ. реєстрації 0117U000246) ;
- «Створення низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем для досліджень об'єктів Всесвіту з поверхні Місяця» (шифр: Селена-2, № держ. реєстрації 0118U000564) ;
- «Інструментальне та інформаційне приєднання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ до світових мереж низькочастотної радіоастрономії» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП, № держ. реєстрації 0118U000561) ;
- «Надчутливі ширококутові багатопозиційні радіоспостереження нетеплового випромінювання Всесвіту» (шифр: Всесвіт-2019 № держ. реєстрації 0118U100094) ;
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр: ФАВОРИТ-5, № держ. реєстрації 0119U100682) ;
- «Створення низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем для досліджень об'єктів Всесвіту з поверхні Місяця» (шифр: Селена-2, № держ. реєстрації 0119U101164);

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Прогрес НЧ радіоастрономії, що спостерігається останні 10-15 років, зумовлений передусім розвитком технологій цифрової обробки сигналу та техніки активних антен. За цей час в усьому світі з'явилося багато проектів НЧ радіотелескопів нового покоління. Серед них є проекти глобальних радіотелескопів, наприклад LOFAR (Європейський союз) [1], SKA (міжнародний проект з розміщенням антен у Південно-Африканській Республіці, Австралії та Новій Зеландії) [2], локальних радіотелескопів, таких як LWA1 (США) [3], MWA (Австралія) [4], NenuFAR (Франція) [5] та ГУРТ (Україна) [6], а також, малих радіотелескопів призначених для розв'язання обмеженого кола задач, наприклад ETA (США) [7], Бразильський інтерферометр [8] і радіотелескоп у Шарджі (ОАЕ) [9].

Глобальні радіотелескопи є універсальними радіоастрономічними інструментами, які розташовані на території декількох країн, або навіть континентів. Локальні радіотелескопи мають менші розміри, і є національними проектами однієї держави. Розробка, проектування та будівництво глобальних та локальних радіотелескопів потребує багато часу (іноді десятки років), і потребує значних фінансових витрат. Малі радіотелескопи проектуються та втілюються доволі швидко колективами окремих наукових та освітніх організацій, але, зазвичай, мають досить скромні характеристики і обмежене коло задач для досліджень.

На даний час LOFAR – єдиний глобальний радіотелескоп, що успішно працює в світі, і є дуже затребуваним серед радіоастрономів. Кількість його станцій поступово збільшується, а програмне та технічне забезпечення постійно модернізується. Радіотелескоп SKA залишається поки що грандіозним проектом, але в процесі його розробки було створено або

удосконалено декілька малих та локальних радіотелескопів–попередників (англ. – pathfinders), наприклад MWA.

1.1 Огляд радіотелескопів нового покоління.

Розглянемо принципи побудови деяких великих НЧ радіотелескопів нового покоління. Інші радіотелескопи, розроблені та працюють за тими ж принципами, і здебільшого відрізняються тільки розмірами та складністю структури.

1.1.1 LOFAR

Міжнародний проект LOFAR знаходиться під управлінням нідерландського інституту радіоастрономії ASTRON (Netherlands Institute for Radio Astronomy) і на сьогодні є єдиним успішним реалізованим проектом глобального НЧ радіотелескопа. Розклад спостережень на LOFAR розписаний на роки вперед, і отримати час для нових досліджень дуже складно.

LOFAR складається з окремих станцій, розташованих у північній частині Європейського континенту, які об'єднані у великий радіоінтерферометр цифровими каналами передачі даних. У Нідерландах розміщено 40 станцій, п'ять станцій у Німеччині, три у Польщі, та по одній у Великобританії, Франції, Швеції, Ірландії та Латвії (рис. 1.1). Центральна частина (ядро) радіотелескопа, знаходиться на півночі Нідерландів на штучному острові. Ядро складається з шести станцій, які умовно названі «Superterp». Вони розміщені всередині кола діаметром 320 м впритул одна до одної (рис. 1.2). На відстані до двох кілометрів від ядра розташовані ще 18 станцій. Крім того, на території Нідерландів містяться ще 16 станцій, віддалених від ядра (remote stations). Станції LOFAR, що розташовані за межами Нідерландів, мають назву «міжнародних» (international stations), їх

побудовано поблизу вже існуючих наукових центрів країн-учасниць проекту. Станції, що складають ядро радіотелескопа, віддалені та міжнародні, відрізняються за конфігурацією (рис. 1.3), що викликано компромісом між економією коштів та ефективністю роботи системи для розв'язання різноманітних наукових задач. Відстань між найвіддаленішими станціями LOFAR складає приблизно 2000 км, яку можна вважати найдовшою базою потенціального інтерферометра.

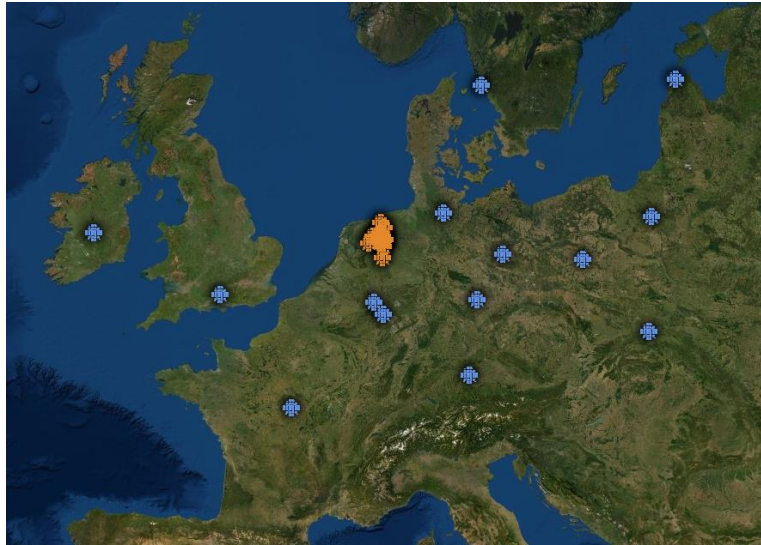


Рис. 1.1. Карта Європи зі станціями радіотелескопа LOFAR [10].



Рис. 1.2. Ядро радіотелескопа LOFAR.

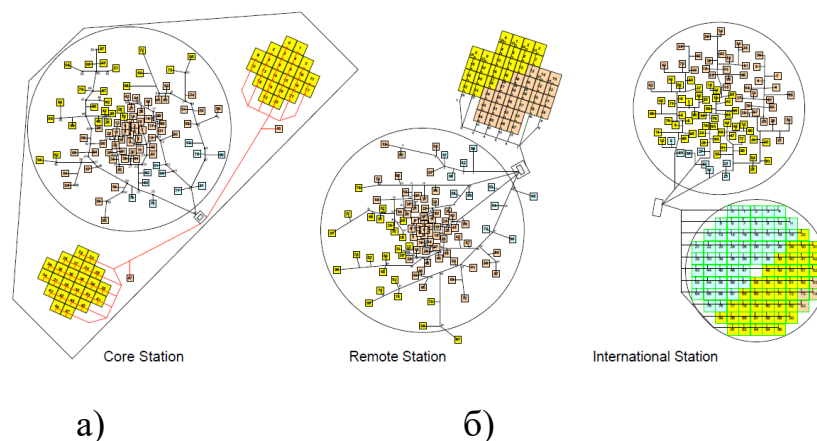


Рис. 1.3. Структури станцій LOFAR: а) ядро; б) віддаленої станції; в) міжнародної станції.

Кожна станція LOFAR має у своєму складі субрешітки двох типів: одної LBA (Low Band Antenna), що призначена для приймання сигналів у діапазоні частот від 10 до 90 МГц, та одної чи двох HBA (High Band Antenna) для частот від 110 до 250 МГц [11]. Кожна станція обладнана цифровими приймачами та обчислювальним центром, де прийняті сигнали проходять первинну обробку та передаються до центрального обчислювального центру LOFAR у м. Грьонінген.

Всі станції, що розташовані у Нідерландах (у ядрі та віддалені) мають по 48 приймачів, а також 96 антенних елементів LBA та 48 елементів HBA. Приймачі можуть одночасно обробляти сигнали чи з 48 антен HBA, чи з 48 антен LBA для реєстрації випромінювання двох ортогональних поляризацій, або з 96 диполів будь-якого діапазону для реєстрації сигналів однієї лінійної поляризації.

Круглі решітки LBA розділені на умовні конфігурації по 48 елементів «внутрішній круг» та «зовнішнє кільце», одну з яких можна обрати для вимірювань. Ці види конфігурацій забезпечують різні області видимості та чутливість за рахунок різної взаємодії сусідніх елементів.

Як видно з рис. 1.3 а, у склад кожної станції, що утворюють ядро радіотелескопа, входять дві субрешітки HBA, що дає можливість отримати

більшу кількість коротких баз у порівнянні зі станціями, які не входять до ядра радіотелескопа, що призводить до більш рівномірного покриття UV-площини для всієї системи. Віддалені станції мають по одній субрешітці НВА. Для зменшення рівня бокових пелюсток результуючої ДН кожна станція має різні кути повороту антенних субрешіток відносно сторін світу, але орієнтація диполів на всіх станціях залишається однаковою.

На відміну від нідерландських, всі міжнародні станції однакові, кожна з них має дві субрешітки, LBA з 96 елементів і НВА з 96 елементів та 96 приймачів для реалізації максимальної чутливості на великих базах [1].

Конфігурації субрешіток для станцій різних типів та діапазонів також відрізняються. У нідерландських станціях 96 LBA елементів формують круглу субрешітку зі зменшуваною від центру густиною псевдовипадкового розташування елементів всередині кола радіусом 43.5 м (рис. 1.3). Така конфігурація забезпечує практично незмінні коефіцієнт заповнення та область видимості на всіх частотах робочого діапазону частот решітки. У міжнародних станціях решітка LBA також має псевдовипадкове розташування елементів всередині кола, але радіус кола складає 35 м, а густина розташування елементів підпорядковується рівномірному закону.

На відміну від LBA, елементи НВА згруповані у прямокутні плоскі міні-субрешітки (tiles) 4×4 елементів (15×15 м). Сигнали всередині міні-субрешіток додаються та фазуються аналоговим методом для підвищення чутливості (за рахунок більшої кількості антен) без збільшення кількості приймачів. Платнею за це є обмежена область видимості, що доступна для подальшого діаграмоутворення [12].

Елементи решіток LBA (рис. 1.4) являють собою пару дротяних диполів для прийому випромінювання двох ортогональних лінійних поляризацій. Плечі диполів з мідного дроту довжиною 1.38 м нахилені до землі, а у точці живлення підключені до малошумних підсилювачів, що змонтовані на вершині стійки з ПВХ трубки на висоті 1.7 м над землею. Під диполем на поверхні землі змонтована ґратка з металічних стрижнів 3×3 м.

Антенна система проектувалася для роботи у діапазоні частот від 10 до 90 МГц, але на практиці зазвичай використовується фільтр, що обмежує діапазон від 30 до 80 МГц, тому що крайні області діапазону засмічені завадами, які виводять у нелінійний режим роботи всю систему. На рис. 1.4 показаний усереднений відгук одного антенного елемента. Автори статті [1] не показали рівень власних шумів системи, але можна припустити, що їх рівень співпадає з рівнем шумів поза робочим діапазоном, на рис. 1.4, тоді перевищення фоновому радіовипромінювання Галактики над власними шумами системи дуже нерівномірне по робочому діапазону частот і складає всього 3-5 дБ.

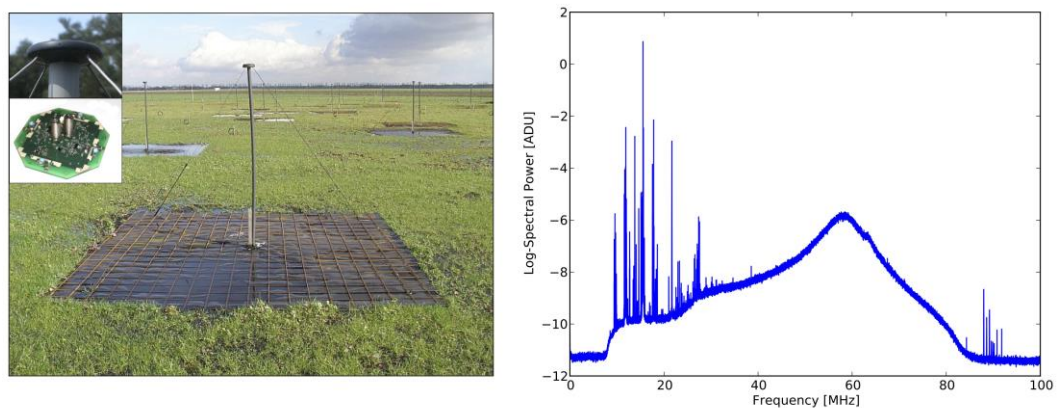


Рис. 1.4. Конструкція елемента НЧ частини станції LOFAR та його відгук на фонове радіовипромінювання і завади у частотній області [1].

У [1] наведено частотні залежності параметра system equivalent flux density (SEFD) та внеску температури фону неба у загальну температуру системи LOFAR (див. рис. 1.5) для різних конфігурацій НЧ субрешіток, що показані на рис. 1.3. Судячи з цих даних для НЧ субрешітки, у кращому випадку шуми неба перевищують власний шум системи у 2 рази (3 дБ), на частоті 35 МГц для конфігурації «зовнішнє кільце». До частоти 65 МГц шуми неба переважають власні шуми системи, а після цієї частоти власні шуми системи стають вищими за фон неба. Видно, що краще використовувати конфігурацію «зовнішнє кільце», бо для частот менше за 45

МГц така конфігурація ефективніша, а на частотах вище 45 МГц конфігурації ведуть себе однаково. Це можна пояснити більшою ефективною площею такої конфігурації і меншими взаємними впливами між елементами субрешітки. Автори статті наводять дані тільки для частот вище 30 МГц, а для діапазону 10-30 МГц шумові характеристики субрешітки залишаються невідомими.

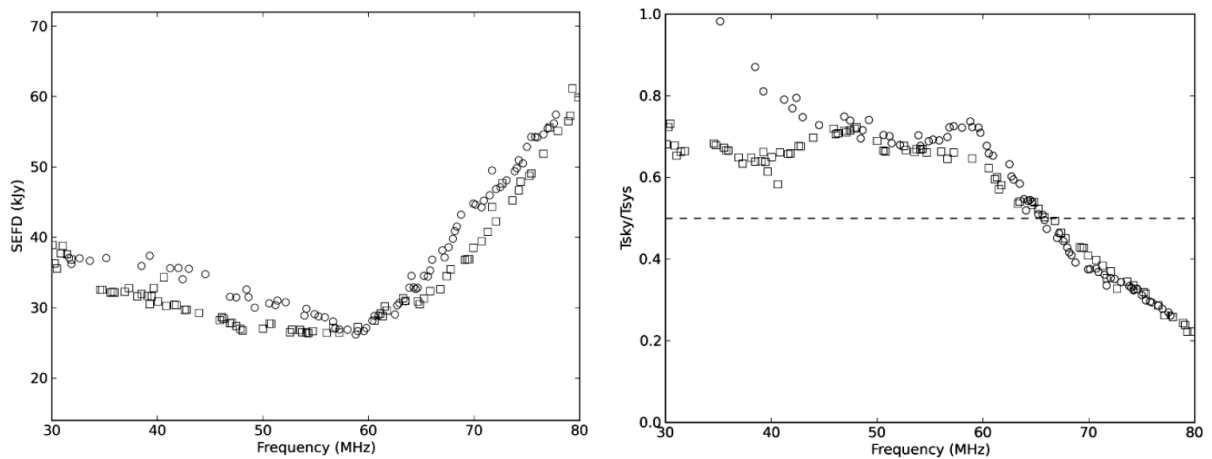


Рис. 1.5. Частотні залежності SEFD та внеску температури фону неба у загальну температуру системи (T_{sky}/T_{sys}) LOFAR для різних конфігурацій НЧ субрешіток. Квадратні позначки відповідають даним для конфігурації «внутрішній круг», круглі – «зовнішнє кільце». Джерело: [1]

У статті [13] наведено відношення ефективної площі активної антени ЛВА до шуму системи (A_e / T_{sys}), яке виміряне для джерела Кассіопея А, та його зміна з часом (рис. 1.6). Цей параметр також можна назвати нормованим відношенням сигнал/шум, бо ефективна площа визначає потужність сигналу від будь-якого джерела, а температура шуму системи залишається сталою. Також у цій статті наведені результати розрахунків системної температури, що ґрунтуються на антенних характеристиках, отриманих за допомогою моделювання із використанням методу моментів (рис. 1.7).

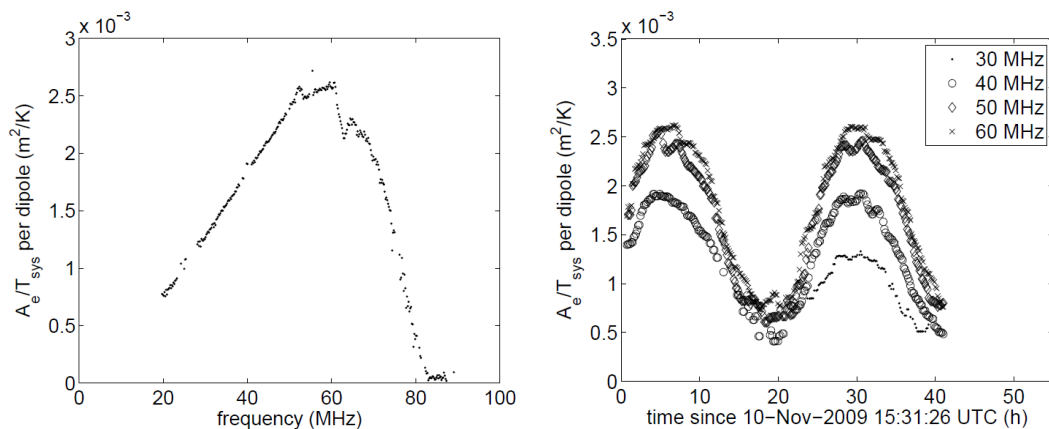


Рис. 1.6. Вимірне нормоване відношення С/Ш антенного елементу LBA LOFAR для джерела Кассіопея А та його зміна з часом.

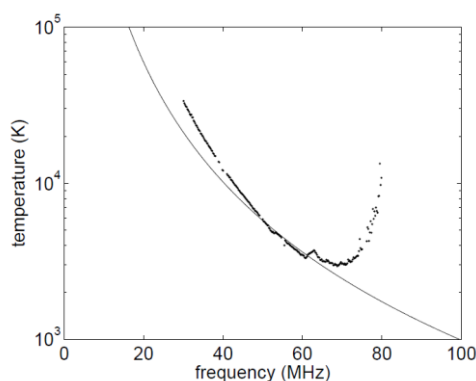


Рис. 1.7. Результати розрахунків залежності системної температури від частоти, що основані на антенних характеристиках, отриманих за допомогою моделювання (точки), та середній фоновий шум неба (неперервна лінія) для порівняння.

Вимірюванням та моделюванню параметрів антен та антенних субрешіток приділяється значна увага. Наприклад, у статті [14] запропоновано стратегію верифікації результатів моделювання шляхом вимірювання поля у ближній зоні антени за допомогою безпілотних літаючих апаратів та описано результати експерименту. Аналогічним способом знаходили та підтверджували ДН елемента субрешітки LOFAR [15]. Радіоастрономічними методами визначити чутливість і зміни характеристик субрешітки з відхиленням від зеніту спробували автори статті [16].

Дослідження характеристик проводилося за допомогою спостережень імпульсного випромінювання пульсарів B0329+54 та B1508+55.

Як видно, радіотелескоп LOFAR має доволі складну структуру, яка дає можливість гнучко його використовувати. Зокрема, є можливість використовувати окремі станції, комбінації станцій, тільки ядро, чи тільки «superterp», в залежності від вимог до чутливості та направленості для конкретної задачі, що розв'язується. Радіотелескоп має два основних режими роботи: режим «beamforming» або цифрового синтезу ДН та режим «imaging» – інтерферометричної побудови зображень. Відрізняються ці режими тільки методами обробки отриманих даних та вибором конфігурації радіотелескопа. Варто відзначити, що радіотелескоп створювався в першу чергу як інструмент для інтерферометричної побудови зображень космічних об'єктів у радіодіапазоні, тому режим цифрового синтезу ДН має ряд обмежень.

1.1.2 LWA

LWA це ще один проект будівництва великого НЧ радіотелескопа-радіоінтерферометра, що реалізується у США. У перспективі інструмент буде складатися з 53 станцій, дозволяючи використовувати методи синтезу апертури для побудови зображень розподілення радіояскравості неба, але автори статті [3] відзначають, що майбутнє проекта поки що невизначене.

На даний момент повністю готова і працює одна станція, що отримала назву LWA1 і може вважатися повноцінним радіотелескопом. LWA1 розташована поблизу центру високочастотного радіотелескопа VLA імені Карла Янського у штаті Нью Мексіко. LWA1 складається з 258 антенних елементів, кожний з яких являє собою два ортогональних зхрещених широкосмугових диполя (рис. 1.8). Сигнали з кожного диполя підсилюються та оцифровуються, формування ДН виконується виключно цифровими методами. Заявлена смуга частот радіотелескопа 10-88 МГц [3].



Рис. 1.8. Загальний вигляд радіотелескопа LWA1.

Кожен елемент антенної решітки розташований над металічною сіткою, що лежить на землі. Розміри сітки 3×3 м, крок – 0.1 м та товщина провідника 1 мм. Застосування сітки пояснюється підвищенням ККД та зменшенням впливу зміни параметрів землі на характеристики антени. Диполь являє собою антену-метелик біля 3 м довжиною, з нахиленими на 45° до землі плечами. Нахил плечей дає можливість забезпечити більш рівномірну залежність чутливості антенної решітки від напрямку приходу хвилі. Точка живлення диполя розташована на висоті 1.5 м над землею. Ефективна площа такого елемента у напрямку zenіту з урахуванням втрат на неузгодження з вхідним імпедансом антенного підсилювача (100 Ом, використовується мікросхема Mini-Circuits GALI-74) складає 0.25 м^2 , 8.72 м^2 , та 2.48 м^2 на частотах 20 МГц, 38 МГц, та 74 МГц, відповідно. Реальні параметри диполів варіюються у межах 25% від вказаних значень, що пояснюється взаємними зв'язками у антенній решітці [3].

Після антенного підсилювача сигнал через ВЧ кабелі з хвильовим опором 50 Ом та додаткові підсилювачі, що компенсують втрати у кабелі, потрапляє на АЦП приймача. Кабелі мають різну довжину (від 43 до 149 м) в залежності від дальності розташування елемента відносно апаратної будівлі. Відповідно сигнали піддаються різній величині загасанням, часовим та

дисперсійним затримкам, які коректуються цифровим способом. Перед приймачем сигнали додатково підсилюються та фільтруються. Приймач на вході має швидкодіючий АЦП з роздільною здатністю 12 біт та працює на швидкості 196 000 000 відліків на секунду. Така частота дискретизації обрана для того, щоб не повністю відфільтровані відбиті гармоніки з діапазону FM радіостанцій 88-108 МГц не зашумлювали вільні ділянки спектра.

Антенна решітка LWA1 має еліптичну форму з осями схід-захід 100 м, та північ-південь 110 м, та складається з 256 антенних елементів. Форма вибрана для забезпечення симетричної головної пелюстки ДН при нахилі променю в область малих схилень, зокрема у напрямок центру Галактики [3].

Ще два антенних елементи розташовано поза решіткою для калібрування системи. Елементи всередині решітки розподілені псевдовипадковим способом. Середня відстань між елементами складає 5.4 м, що дорівнює 0.36λ та 1.44λ на частотах 20 МГц та 80 МГц відповідно. Мінімальна відстань між диполями 5 м. Форма ФАР вибрана як оптимальна для синтезу апертури та побудови зображень радіояскравості повним радіотелескопом LWA.

У роботі [17] як доказ чутливості радіотелескопа LWA1 наведена частотна залежність антенної температури (див. рис. 1.9) у двох випадках: у штатному підключенні підсилювача та диполя, а також, при підключенні узгодженого опору до входу підсилювача. З рисунку видно, що відгук диполя на галактичне фонове випромінювання у більшій частині діапазону перевищує власні шуми системи у 5 разів (7 дБ).

Також у [18] наведено графік добової зміни антенної температури одного диполю на частотах 38 та 74 МГц, що представлено на рис. 1.10. Добре видно, що перепад антенної температури за добу складає близько 3 дБ, що підтверджує чутливість антени до галактичного фонового випромінювання.

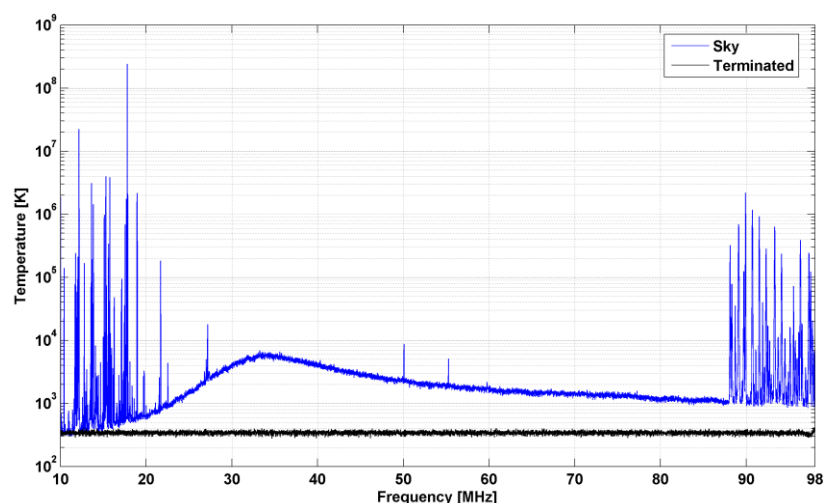


Рис. 1.9. Антенна температура, що виміряна за допомогою приймача LWA1, віднесена до клем антени. Верхня крива: результат, що представляє антенну температуру у небо (викиди є результатом завадових сигналів штучного походження); нижня крива: те ж вимірювання проведене при навантаженні входу антенного підсилювача на узгоджений опір, що показує оцінку температури внутрішнього шуму системи. Спектральне розрізнення 6 кГц, час інтегрування 10 с. Місцевий час – невдовзі після полудня [17].

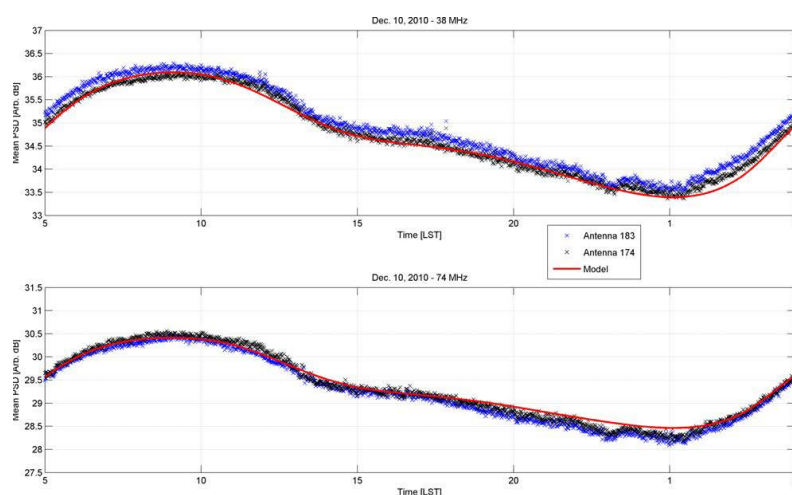


Рис. 1.10. Результати вимірювань добової зміни антенної температури диполя LWA на частотах 38 та 74 МГц [18].

Система формування променів ДН радіотелескопа побудована на принципі часової затримки сигналу та додавання сигналів у цифровому вигляді. Груба попередня затримка виконується за допомогою буфера даних,

після якого реалізовано фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою. Параметри цифрової обробки можуть бути задані користувачем для формування променів визначеної форми або формування нулів ДН у визначних напрямках. Чотири незалежних промені двох лінійних поляризацій можуть бути сформовані одночасно у смузі частот 16 МГц у діапазоні 10-88 МГц. Існує можливість запису необроблених даних з АЦП всіх диполів, які дають можливість за допомогою подальшої обробки сформувати довільну кількість променів, однак можливості даного підходу сильно обмежені необхідним дисковим простором для зберігання даних та обчислювальних потужностей для їх обробки.

Стаття [18] разом з попередньою описує технічні характеристики, техніку калібрування антенної решітки та перші пробні результати спостережень з метою тестування радіотелескопа. Як тестовий сигнал у [18] наводиться запис відгуку радіотелескопа з променем в зенітному напрямку на добовий рух землі з ілюстрацією завадової ситуації у місці розташування радіотелескопа (рис. 1.11).

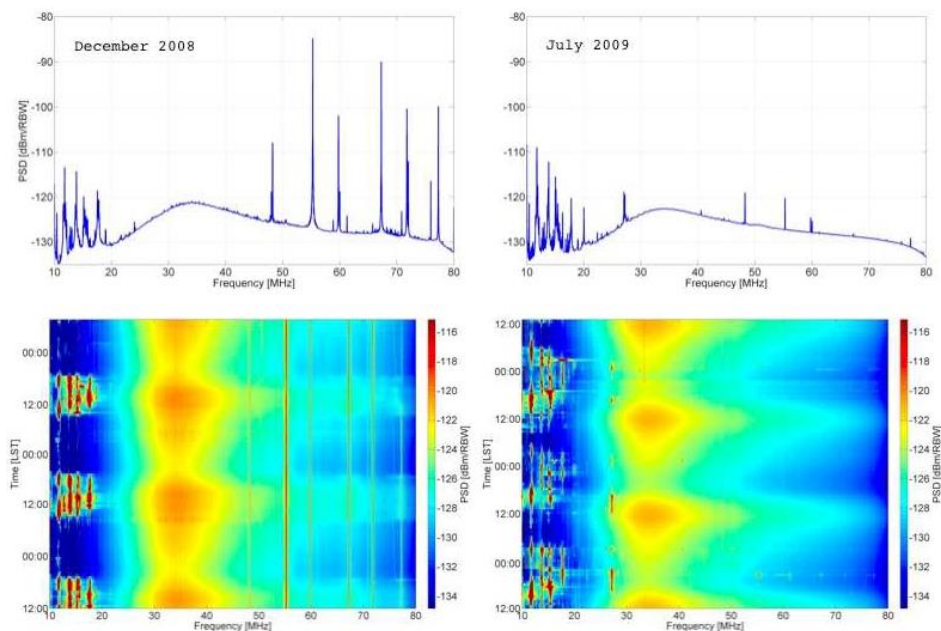


Рис. 1.11. Завадова ситуація на LWA-1. Ліва панель показує миттєвий та динамічний спектр до переключення місцевих операторів на цифрове телебачення. Права панель показує те ж саме після того, як аналогові станції звільнили спектр. У спектрі переважають шуми Галактики [18].

1.1.3 NenuFAR

Радіотелескоп NenuFAR був запропонований як збільшена НЧ антенна решітка станції LOFAR FR606, що знаходиться в обсерваторії Нансе, Франція. Перша назва цього проекту LSS (LOFAR super station). Антенна решітка NenuFAR має змогу працювати як в складі LOFAR замість антен FR606, так і як самостійний радіотелескоп. Розробка геометрії антенних решіток, систем аналогового фазування та підсилення сигналів була проведена у співробітництві з українськими колегами з РІ НАНУ. У антенній решітці NenuFAR застосовано принцип змішаного аналого-цифрового фазування, конструкція антенних елементів у значній мірі повторює конструкцію диполів LWA, а антенний підсилювач реалізований на мікросхемі власної оригінальної розробки.

Субрешітка (tile) NenuFAR являє собою регулярну гексагональну антенну решітку з 19 диполів (рис. 1.12а), фазування сигналів всередині якої відбувається по принципу реальної часової затримки сигналу, що реалізований на переключенні відрізків коаксіального кабелю ліній затримки. Для цифрового фазування сигналів субрешіток використовується або АЦП LOFAR, що призначено для підключення окремих диполів LBA LOFAR, або цифровий приймач власної розробки для роботи в режимі окремого радіотелескопа. Максимальна кількість субрешіток ядра радіотелескопа обмежена кількістю сигнальних входів АЦП станції LOFAR і дорівнює 96. Усі субрешітки ядра знаходяться всередині кола діаметром 400 м (рис. 1.12б). Додатково планується спорудження ще 6 віддалених на 1-3 км субрешіток для роботи у режимі окремого радіотелескопа [5], [19]–[22].

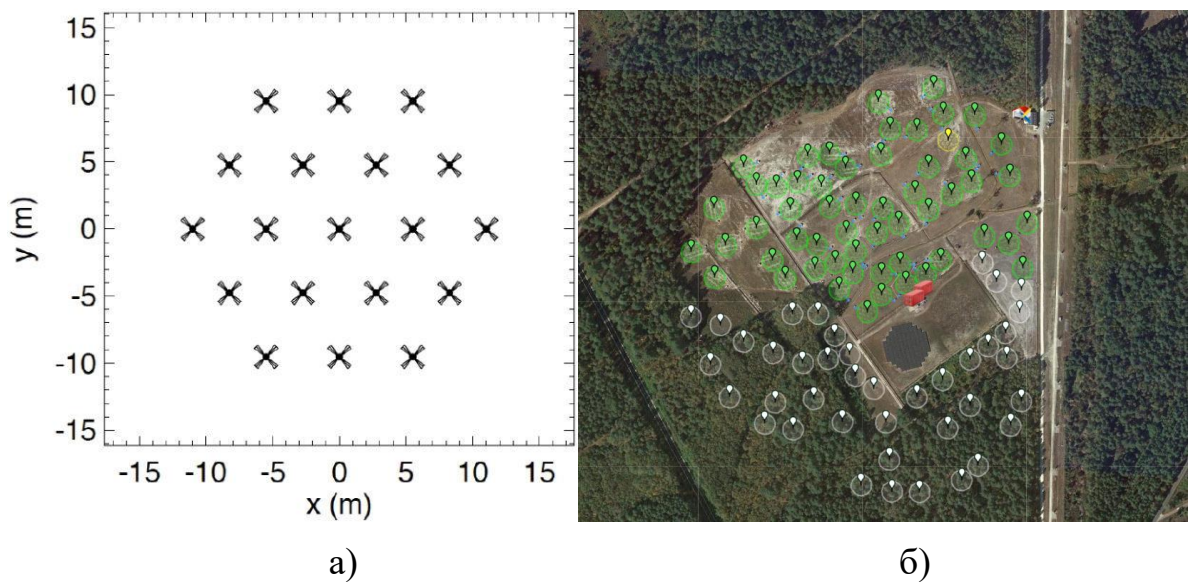


Рис. 1.12. Розташування 19 антенних елементів у субрешітці NenuFAR (а) та розміщення субрешіток у ФАР (б).

Проект знаходиться у стадії реалізації. Вже побудовано 54 субрешітки ядра. Субрешітки, що повністю готові з літа 2019 року, використовуються для радіоастрономічних спостережень, невдовзі очікуються публікації перших результатів досліджень.

1.1.4 SKA – AAVS0.5

Глобальний проект SKA знаходиться тільки на стадії розробки і випробування антен прототипів для майбутнього радіотелескопа. Головним претендентом на роль низькочастотної субрешітки SKA є проект Aperture Array Verification System 0.5 (AAVS0.5). Це розріджена субрешітка з 16 активних логоперіодичних антен («SKALA») псевдохаотично розташованих у колі діаметром 8 м (рис. 1.13), яка працює в діапазоні 70 – 450 МГц і розташована на території майбутнього радіотелескопа SKA, поряд з MWA. У активній антені використано малошумний підсилювач (МШП) з номінальною шумовою температурою 33 К та коефіцієнтом підсилення 43 дБ на частоті 180 МГц. Формування променя виконується за допомогою 32

аналогових ліній затримки, кожна з яких забезпечує затримку 435 пс, що дає можливість AAVS0.5 сканувати у діапазоні зенітних кутів $\sim 30^\circ$ [4], [23].

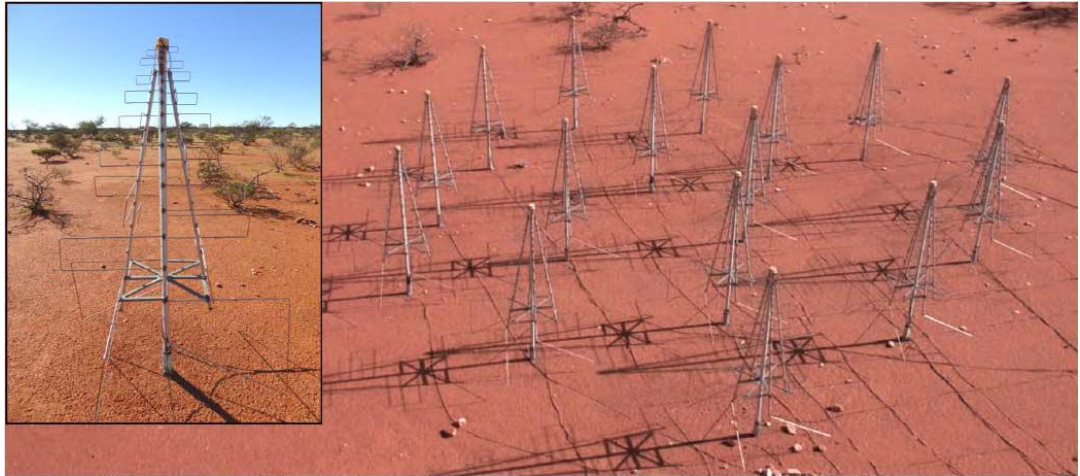


Рис. 1.13. Фото активної логоперіодичної антени «SKALA» та субрешітки AAVS0.5 з 16 таких антен.

Субрешітка AAVS0.5 була протестована тільки у інтерферометричному режимі з субрешітками, приймачами і корреляторами MWA. Для моделювань використовувалося програмне середовище FEKO та типові значення параметрів сухого та вологого ґрунту на обсерваторії. При вимірюваннях характеристик було використане джерело Гідра А через те, що воно є найбільш потужним на південному небі, а також через його близькість до зеніту у місці розташування телескопу. На рис. 1.14а показано результати моделювання та вимірювання відношення ефективної площі до температури системи для 2 хвилин вимірювань в напрямку джерела Гідра А. На рис. 1.14б наведено результати моделювання та вимірювань ДН субрешітки на частоті 220 МГц [23].

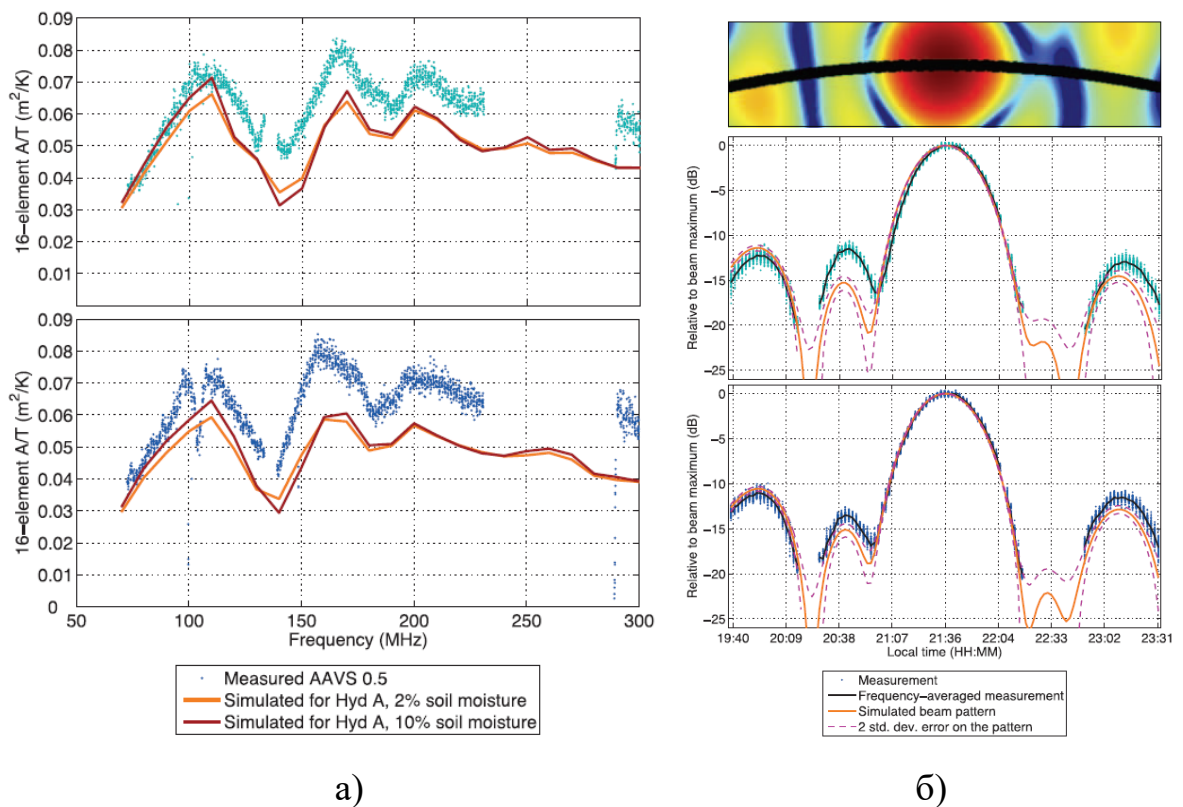


Рис. 1.14. Результати вимірювань та моделювання відношення ефективної площі до температури системи AAVS0.5 впродовж 2 хвилин вимірювань в напрямку джерела Гідра А (а) та ДН AAVS0.5 на частоті 220 МГц при спостереженнях джерела Гідра А (б).

1.2 Радіотелескоп ГУРТ

Гігантський український радіотелескоп (ГУРТ) – це радіоастрономічний інструмент нового покоління [6], [24], [25], призначений для роботи у діапазоні частот 8-80 МГц, який будується поряд з відомим радіотелескопом УТР-2 (36°56'29" сх.д., 49°38'17" пн.ш.) на території Радіоастрономічної обсерваторії ім. С. Я. Брауде в Харківській області, Україна. Радіотелескоп ГУРТ покликаний доповнити УТР-2 за рахунок розширення смуги частот 8-80 МГц, приймання хвиль двох ортогональних лінійних поляризацій, збільшення загальної ефективної площі та застосування цифрового фазування, а також, одночасного формування

багатьох променів ДН. У склад ГУРТ входить активна фазована антенна решітка (АФАР), що утворена з ідентичних 25-елементних субрешіток, число яких збільшується з перебігом будівництва радіотелескопа, та згідно з планами має досягти приблизно 100.

Концепція ГУРТ передбачає створення щільного ядра радіотелескопа, де субрешітки розташовані впритул одна до одної, а також окремих секцій, що псевдохаотично розподілені по площі радіоастрономічної обсерваторії ім. Брауде (рис. 1.15). Такий підхід дасть можливість максимально використати потенціал обсерваторії, забезпечивши одночасно високу чутливість, просторову вибірковість та можливість формування багатьох баз інтерферометра.

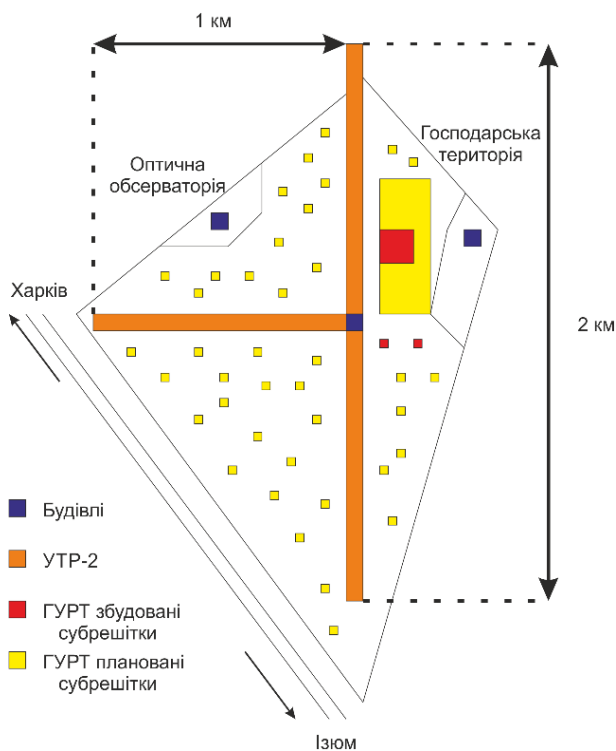


Рис. 1.15. Фактичне розташування побудованих секцій ГУРТ та концепція їх розподілення по мірі будівництва на території обсерваторії.

В АФАР ГУРТ застосовується комбіноване формування променя, всередині субрешітки – дискретне (за допомогою ліній часової затримки сигналу) [26], [27], а між субрешітками – цифрове (шляхом введення

затримки у потоки даних в цифрових пристроях та обчислювальних засобах) [28]. Кожна субрешітка, насправді, є самостійною АФАР, промінь якої може дискретно рухатися у всій верхній півсфері, внаслідок чого субрешітка може працювати як у складі великої АФАР ГУРТ, так і автономно [24]. Сигнали від субрешіток надходять на входи багатоканального приймача з АЦП, де піддаються цифровій обробці, після чого записуються на носії інформації.

Кожна субрешітка складається з 25-елементної регулярної антенної решітки та діаграмоутворювальної схеми, що виконує функції підсилення, фазування та додавання прийнятих сигналів. Елементи решітки розташовані у вузлах квадратної сітки з кроком $d = 3.75$ м (рис. 1.16 та 1.17а).



Рис. 1.16. Субрешітка ГУРТ з 25 активних антенних елементів, в центрі – апаратна шафа з пристроями керування, фазування і підсилення сигналів, а також, живлення субрешітки.

Кожний елемент решітки складається з двох плоских взаємно перпендикулярних активних дротяних диполів складної форми з незалежними входами, що дає можливість роздільно приймати хвилі двох ортогональних лінійних поляризацій. Схема розташування антенних

елементів у секції та геометрія одного з них наведені на рис. 1.17а та 1.17б, відповідно.

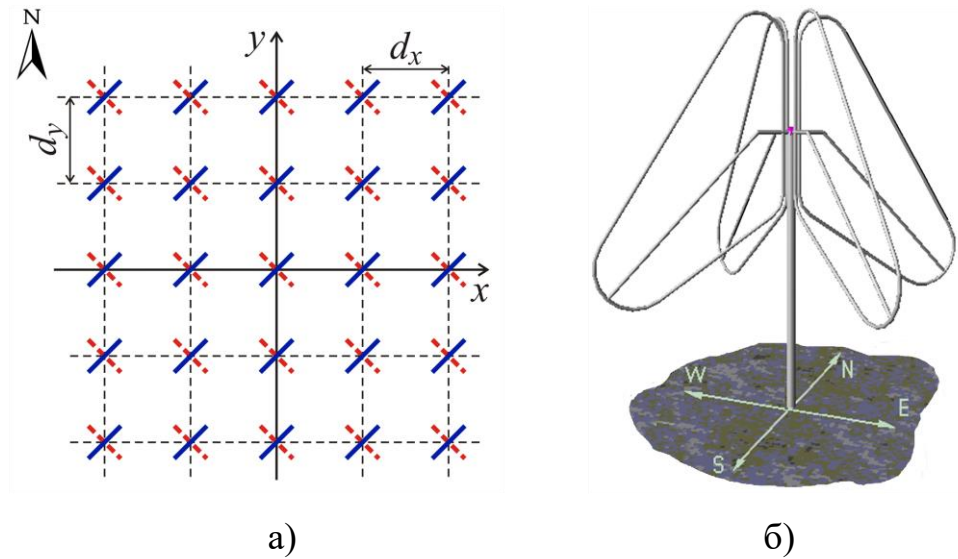


Рис. 1.17. Розташування антенних елементів у субрешітці (а) та геометрія активної антени – диполя ГУРТ (б).

Диполь виготовлено з тонкостінних мідних трубок 12 мм у діаметрі, що вкриті тонким шаром діелектричного матеріалу для захисту від впливу навколишнього середовища. Довжина плеча диполя (лінія ABC на рис. 2.1,б) складає 1,4 м. Точка живлення диполя (точка А) знаходиться на висоті $h=1.6$ м над поверхнею землі. Стійка диполя виготовлена з труби діаметром 60 мм, нижня її частина сталева, верхня – пластикова. У пластиковій частині знаходяться два антенні підсилювачі, по одному на кожен диполь. Кожний антенний підсилювач виконує також функції симетруючого пристрою, складається з МШП, виконаного за балансною схемою Дарлінгтона, узгоджуючого пристрою та короткої двопровідної лінії передачі, що з'єднує його вхід з клемми диполя. Антенний підсилювач (рис. 1.18) має малий коефіцієнт шуму ($F \sim 1.3$ dB) та демонструє доволі високу лінійність ($IP3 \sim 30$ dBm). У МШП використовуються високочастотні транзистори BFG67 (Q1 та Q2), а також, BFG196 (Q3 та Q4). Індуктивності L1-L2 на вході антенного підсилювача виконують роль найпростішого узгоджуючого кола. Трансформатор забезпечує перетворення імпедансу у співвідношенні 4:1.

Вихід антенного підсилювача з'єднаний з діаграмоутворювальною схемою субрешітки за допомогою радіочастотного кабеля з хвильовим опором 50 Ом.

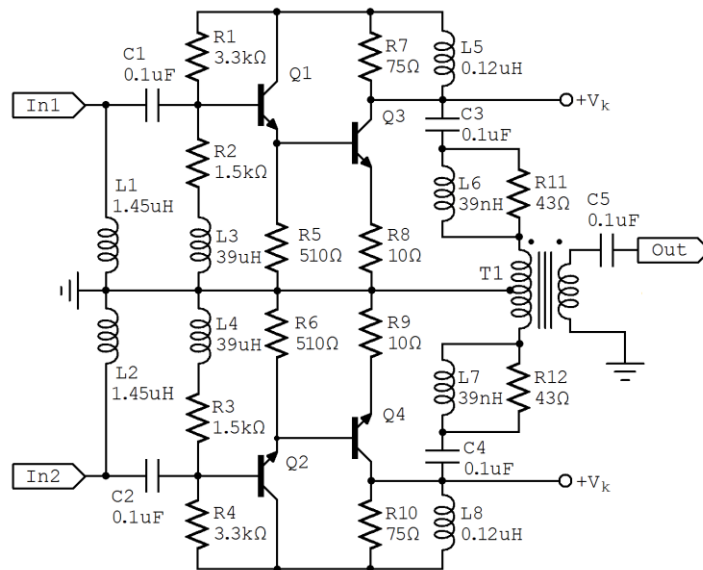


Рис. 1.18. Принципова електрична схема антенного підсилювача елемента антенної решітки ГУРТ.

Ряди диполів субрешітки розташовані уздовж напрямків Північ-Південь та Захід-Схід, а самі диполі повернуті на кут 45° відносно цих ліній. Сигнали, що переносяться хвилями двох ортогональних лінійних поляризацій та приймаються ортогональними диполями, обробляються роздільно у двох ідентичних трактах, функціональна схема одного з яких наведена на рис. 1.19, де видно, що прийняті диполями сигнали одразу поступають на входи високолінійних МШП [25], а після них – на входи діаграмоутворювальної схеми.

Діаграмоутворювальна схема складається з шести ідентичних модулів ДМ-1...ДМ-6 [26], [27], які виконують функції додавання та фазування сигналів всередині субрешітки за рядково-стовпцевим принципом. П'ять з них, ДМ-1...ДМ-5, фазують та додають сигнали всередині кожного ряду диполів, а шостий, ДМ-6, – сигнали з виходів попередніх п'яти модулів. Вихід модуля ДМ-6, є, по суті, виходом субрешітки.

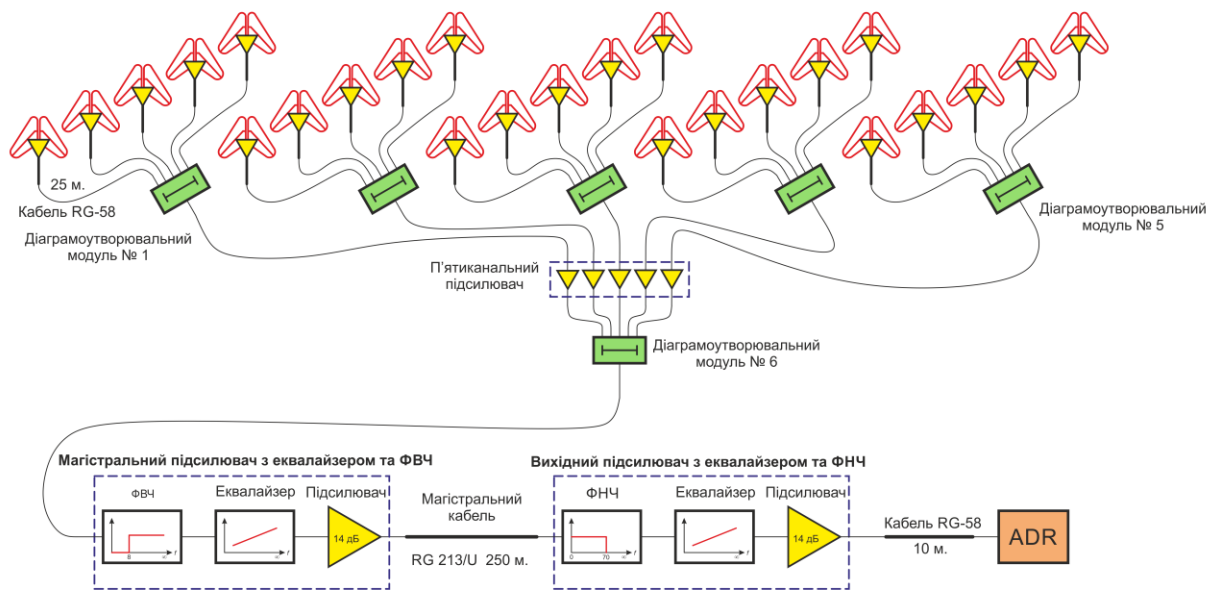


Рис. 1.19. Функціональна схема сигнального тракту субрешітки ГУРТ.

Кожен ДМ (рис. 1.20) складається з п'ятиканального дискретного п'ятирозрядного фазообертача на відрізках ліній часової затримки, що переключаються з каналу в канал, та рівноплечого суматора 5:1, який забезпечує рівномірне амплітудне додавання сигналів і незалежність напрямку головного максимуму множника решітки від частоти.

Дана схема дає можливість формувати 17×17 двовірних лінійних розподілень часових затримок у каналах елементів субрешітки, що компенсують фазові зсуви між сигналами, що переносяться 289-ма плоскими електромагнітними хвилями. Просторово-кутовий спектр цих хвиль характеризується фіксованими напрямками їх приходу ($\theta_{p,q}, \varphi_{p,q}, p, q = -8, \dots, 8$), які є напрямками максимумів головних пелюсток множника решітки ДН секції АФАР. Ці напрямки можна наочно уявити у вигляді сукупності точок $M_{p,q}$ на UV -площині (рис. 1.21), де U та V – узагальнені кутові координати, що визначаються як $U = \sin \theta \sin \varphi$ та $V = \sin \theta \cos \varphi$, а індекси p та q вказують на положення максимуму променя уздовж відповідних координат.

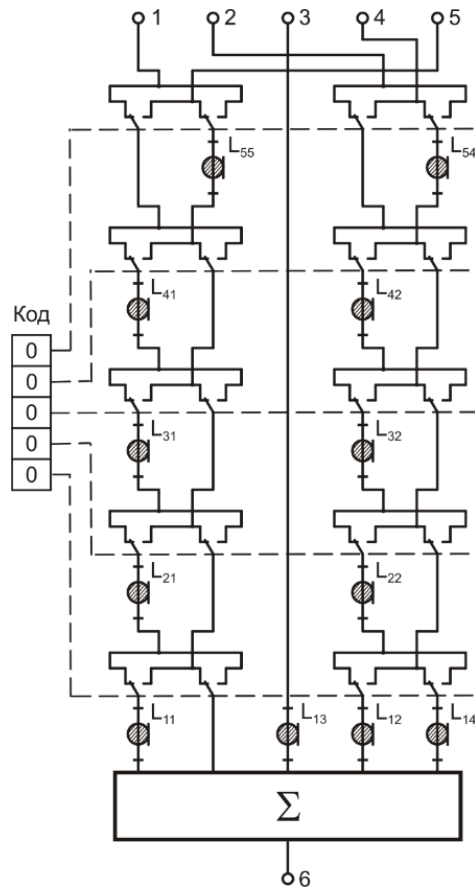


Рис. 1.20. Схема височастотного тракту діаграмоутворювального модуля субрешітки ГУРТ.

На рис. 1.21 добре видно, що точки $M_{p,q}$ розташовані у вузлах регулярної квадратної сітки, крок якої визначається співвідношенням $\Delta U = \Delta V = \tau_{\min} / cd$, де τ_{\min} – час пробігу електромагнітної хвилі по ділянці лінії затримки, що відповідає молодшому розряду фазообертача, c – швидкість поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі (швидкість світла у вакуумі), d – відстань між сусідніми елементами антенної решітки. У даному випадку цей крок дорівнює 0.1216 [27]. Однак не всі хвилі згаданого спектра належать до області реальних кутів («області видимості»), яка на UV -площині має форму круга одиничного радіуса (рис. 2.3). На рисунку видно, що в цю область потрапляють тільки 213 з 289 хвиль, що відповідають 213 реальним променям, які можуть бути сформовані субрешіткою АФАР ГУРТ.

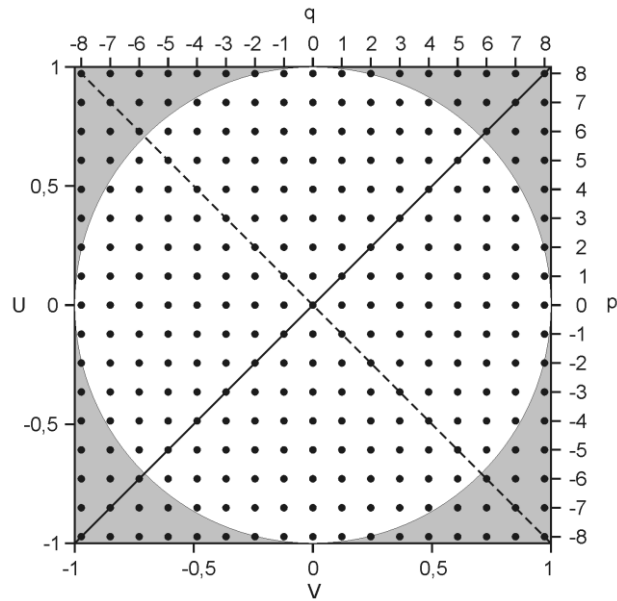


Рис. 1.21. Напрямки максимумів головних пелюсток множника решітки ДН секції АФАР ГУРТ.

Під час радіоастрономічних спостережень промені ДН секції АФАР перемикаються згідно заданої програми за допомогою керувального комп'ютера, який у реальному часі обчислює п'ятирозрядний код керування по кожній координаті та пересилає його на відповідні перемикачі ДМ.

Цифровий приймач ADR [28], [29], на 2 входи якого потрапляють сигнали від двох ортогональних поляризацій субрешітки ГУРТ, розташований у апаратній будівлі на відстані близько 200 м від кластеру антенних субрешіток. Для забезпечення передачі на цю відстань прийнятих радіочастотних сигналів без зменшення їх співвідношення С/Ш використовується фідерна система [30] (рис. 1.19). Вона включає ~300 м кабелю марки RG-213U з набором додаткових пристроїв: 3 яруси підсилювачів сигналу, фільтри ВЧ та НЧ, а також два еквалайзери. Схеми фідерних підсилювачів повторюють схему антенного МШП. Підсилювачі компенсують втрати сигналу у кабелях, фільтри дають можливість позбутися позасмугових завад, а два еквалайзери забезпечують максимально рівномірний відгук субрешітки у всьому робочому діапазоні частот.

1.3 Застосування малих радіотелескопів для розв'язання астрофізичних задач

Малі радіотелескопи природньо застосовувалися для спостережень на зорі радіоастрономії. Зараз малі радіотелескопи будують тільки для вирішення обмеженого кола задач, а іноді для однієї конкретної задачі. Водночас будівництво великих радіотелескопів займає довгий час, а час спостережень на них дуже обмежений, тому іноді частини великих радіотелескопів також використовують у радіоастрономічних спостереженнях. Розглянемо такі випадки.

Субрешітка LWA1 радіотелескопа LWA складається з 256 диполів, і є найбільшою серед субрешіток сучасних радіотелескопів. Після введення в дію LWA1 було проведено серію тестових спостережень, що описані у [18]. За допомогою LWA1 успішно створено каталог пульсарів на низьких частотах [31], цей телескоп дає можливість досліджувати гігантські імпульси пульсара B0950+08 [32], вивчати розсіяння імпульсного випромінювання [33] та виконувати пошук транзієнтів [34]. Оцінено його можливості в дослідженні спалахів гамма-променів [35] і проведено огляд всього неба для пошуку слідів метеорів на частоті 55.25 МГц [36]. LWA1 також успішно застосовується у міжнародних проектах з дослідження спорадичного радіовипромінювання Юпітера [37] та Сонця [38].

Радіотелескоп LOFAR має можливість використовувати міжнародні станції окремо від ядра радіотелескопа та виділяє час спостережень країнам-учасникам проекту. Так окремі міжнародні станції використовуються для спостереження транзієнтів та пульсарів [39]–[41], а також для дослідження сонячного радіовипромінювання та космічної погоди [42]–[45].

Субрешітка-прототип радіотелескопа MWA з 32 елементів дає можливість успішно проводити огляд галактичних та позагалактичних радіоджерел на частоті 189 МГц з просторовим розділенням 5,6 кутових хвилин та досягає чутливості 15 мЯн/промінь [46], проводити огляд

транзієнтів на частоті 154 МГц [47], а також досліджувати спорадичне випромінювання Сонця у діапазоні 170.9 – 201.6 МГц [48].

Малі НЧ телескопи створюються для розв'язання конкретних задач, наприклад ЕТА (США) [7], LOPES [49], інтерферометр у Бразилії [8] для пошуку імпульсного типу випромінювання від транзієнтів та спалахів гамма–променів. Радіотелескоп у Шарджі (ОАЕ) призначений для студентських досліджень спорадичного випромінювання Сонця, Юпітера, а також галактичного фонового випромінювання на частоті 20.1 МГц [9]. Принципи, що використано при проектуванні таких радіотелескопів, є аналогічними застосованим у глобальних та локальних радіотелескопах, але використовується менша кількість антен та спрощені підходи обробки сигналу для зниження вартості їх конструювання.

1.4 Визначення чутливості субрешіток НЧ радіотелескопів нового покоління

Дослідження чутливості радіотелескопів завжди було нагальною задачею [50]. Вимірювання характеристик радіотелескопів проводяться радіоастрономічними методами або за допомогою безпілотних літальних апаратів [14], [15], [51]. Результати вимірювань було коротко показано у попередніх підрозділах. Однак, вимірювання таких характеристик є доволі складною, а іноді і неможливою задачею. Тому важливо мати результати чисельного моделювання основних характеристик радіотелескопа.

Існує багато робіт, наприклад [3], [4], [8], [13], [23], [52]–[61], метою яких є дослідження антенних решіток, створених для різноманітних НЧ радіотелескопів, у яких особливу увагу присвячено аналізу їх чутливості. Всі вони містять дані про характеристики та можливості нових радіоастрономічних інструментів, а також застосовані методики при їхньому аналізі, але аналіз чутливості активних антен, що працюють в діапазоні до 100 МГц, виконувався тільки дуже приблизно. Декілька авторів, що

приділяли цьому увагу [8], [56], зверталися до спрощених версій методик розробки мікрохвильових малошумних МШП [62] без врахування впливу імпедансу джерела сигналу на коефіцієнт шуму підсилювача. Неточності, спричинені цим спрощенням, сильно проявляють себе при аналізі шумів активних антен для НЧ радіотелескопів, особливо на частотах до 20 МГц, де зазвичай спостерігається сильна неузгодженість імпедансів диполу та МШП.

У останні роки у зв'язку з розробкою та побудовою нових НЧ та високочастотних радіотелескопів, тема розрахунку шумових параметрів та чутливості активних антенних решіток знову стала актуальною [63]–[68]. У більшості з цих робіт основні зусилля авторів спрямовані на перегляд традиційних концепцій та визначень теорії антен, а також на розробку методики аналізу та проектування ФАР опромінювачів великих дзеркальних антен. І хоча автори анонсували, що ця методика може бути застосована для НЧ радіотелескопів, що використовують ФАР, на даний момент ми не знайшли жодної доступної публікації, що розглядає дослідження чутливості будь-якого НЧ радіотелескопа. Роботи [52], [53], [56], [57], [60], [69], навпаки мають виключно практичну спрямованість, оскільки в них досліджуються характеристики різноманітних діючих НЧ радіотелескопів. Цікавою є робота [57], яка пропонує метод та показує результати аналізу чутливості радіотелескопа LWA1. Однак, через складнощі чисельних розрахунків для цієї ФАР автор використав декілька принципових спрощень, а саме: знехтував кореляцією шуму в антенних елементах, використав наближену оцінку шуму землі, не прийняв до уваги вплив змін у коефіцієнті відбиття антенного елемента на шумову температуру антенного підсилювача тощо.

Оцінка чутливості малих НЧ радіотелескопів проводилися ще більш наближеними та простими методами [7]–[9], [49]. Таким чином на сьогодні в літературі відсутні повні докладні дані з чутливості, енергетичних та шумових характеристик субрешіток сучасних радіотелескопів, які були б отримані експериментальним способом або шляхом чисельного моделювання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Час проведення досліджень на глобальних та великих НЧ радіотелескопах є дуже обмеженим ресурсом, через їх малу кількість, довготривале будівництво та високу затребуваність. Через це дослідники проводять несистематичні дослідження, використовуючи частини недобудованих радіотелескопів (LWA1, MWA, NenuFAR) або міжнародні станції LOFAR, які інколи незадіяні у певних дослідженнях. Деякі країни впроваджують незалежні проекти зі створення невеликих НЧ радіотелескопів, які призначені для розв'язання обмеженого кола радіоастрономічних задач.

Серед задач, що розв'язуються за допомогою малих радіотелескопів та субрешіток великих радіотелескопів, здебільшого є дослідження спорадичного радіовипромінювання Сонця та Юпітера, пошук транзієнтних сигналів, дослідження пульсарів та фонового галактичного випромінювання.

Параметри малих радіотелескопів та субрешіток великих радіотелескопів здебільшого визначалися експериментальним шляхом, бо теоретичні методи, що застосовувалися при їх оцінці, є досить наближеними. Результати експериментальних вимірювань параметрів радіотелескопів не можна вважати надійними та точними через велику кількість факторів, які ускладнюють вимірювання та спотворюють їх результати.

Субрешітка ГУРТ стоїть в ряду перелічених малих радіотелескопів, які можна використовувати для радіоастрономічних досліджень. Для того, щоб її правильно та ефективно використовувати необхідно якнайточніше визначити її параметри, а також провести низку радіоастрономічних спостережень, які б доводили її цілковиту придатність для розв'язання певних радіоастрономічних і астрофізичних задач у НЧ діапазоні.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СУБРЕШІТКИ АФАР ГУРТ

Субрешітки є основними структурними одиницями АФАР ГУРТ, комбінуючи які, можна створювати різноманітні конфігурації радіотелескопа, зручні для проведення тих чи інших радіоастрономічних спостережень у широкому діапазоні частот. Через це дослідження частотних залежностей параметрів субрешітки АФАР для всіх можливих напрямків її променю у всьому секторі сканування є важливою задачею.

У цьому розділі розроблено математичну модель субрешітки АФАР ГУРТ та її елемента, виконано числові дослідження їх параметрів, та наведено результати експериментальних досліджень, що дозволило впевнитися у правильності розроблених моделей і зроблених розрахунків.

2.1 Постановка задачі

Сучасні великі НЧ радіотелескопи складаються з окремих субрешіток, будівництво та введення в експлуатацію яких відбувається послідовно протягом декількох років і навіть десятиліть. Тому є сенс використовувати вже побудовані та налаштовані субрешітки для проведення астрофізичних досліджень ще до того, як будівництво радіотелескопа в цілому буде завершено. Дійсно, ці субрешітки можуть грати роль невеликих радіотелескопів, придатних для проведення радіоастрономічних спостережень і розв'язання окремих астрофізичних задач [24]. В будь-якому разі для оцінки можливостей та повноцінного використання субрешіток як автономних малих радіотелескопів чи секцій великих радіотелескопів необхідно добре знати їх параметри.

Радіотелескоп являє собою радіотехнічну систему, призначену для приймання радіохвиль з наднизькою інтенсивністю, тому однією з

найважливіших його характеристик є чутливість. Чутливість у більшості радіосистем визначається за критерієм сигнал/шум

$$SNR = \frac{P_s}{P_{sys}}, \quad (2.1)$$

де P_s – потужність корисного сигналу на виході приймальної системи, що визначається, як

$$P_s = W^i A_e \eta_a K_s = W^i \frac{\lambda^2}{4\pi} G_a K_s; \quad (2.2)$$

$P_{sys} = k_B T_{sys} = k_B K_s T_{sys eff}$ – сумарна (системна) потужність шумів на виході системи; W^i – густина потоку потужності електромагнітної хвилі довжиною λ , що несе корисний сигнал; A_e , G_a і η_a – параметри приймальної антени – ефективна площа, коефіцієнт підсилення і ККД, відповідно; K_s – коефіцієнт передачі сигнального тракту (за потужністю); $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T_{sys} – шумова температура системи на вході приймача; $T_{sys eff} = T_{sys} / K_s$ – ефективна системна шумова температура, віднесена до клем антени.

Формулу (2.1) можна привести до такого виду

$$SNR = \frac{\lambda^2 W^i}{4\pi k_B} \left(\frac{G_a}{T_{sys eff}} \right) = \frac{W^i \eta_a K_s}{k_B} \left(\frac{A_e}{T_{sys eff}} \right). \quad (2.3)$$

З цієї формули випливає, що SNR є пропорційною до $G_a / T_{sys eff}$, або до $A_e / T_{sys eff}$, тому часто чутливість приймальної системи визначають у термінах G/T [70]–[72] або A/T [61].

У радіоастрономії знайшов застосування інший спосіб оцінювання чутливості радіотелескопів. За критерій чутливості в ній найчастіше використовують флуктуаційну чутливість, яка визначає мінімальну густину потоку ΔS_{min} електромагнітної хвилі, яку можна виявити на фоні повного шуму системи [6], [50].

$$\Delta S_{\min} = \frac{k_B T_{sys eff}}{A_e \sqrt{\Delta f \Delta t n}}, \quad (2.4)$$

де Δf – смуга пропускання приймача; Δt – час інтегрування після детектора; n – число записів, що усереднюються.

З флуктуаційною чутливістю дуже тісно пов'язаний ще один показник, так званий SEFD (System Equivalent Flux Density) [73], який чисельно дорівнює густині потоку потужності прийнятої електромагнітної хвилі, що забезпечує $SNR = 1$. SEFD визначається [73] як

$$SEFD = \frac{k_B T_{sys eff}}{A_e}. \quad (2.5)$$

Не важко зрозуміти, що SEFD і ΔS_{\min} зв'язані між собою співвідношенням

$$\Delta S_{\min} = \frac{SEFD}{\sqrt{\Delta f \Delta t n}}. \quad (2.6)$$

З рівняння (2.6) випливає, що відмінність між ΔS_{\min} від SEFD полягає лише в тому, що до ΔS_{\min} додані параметри Δf , Δt і n , котрі не залежать від параметрів приймальної системи і вибираються перед проведенням радіоастрономічних досліджень з урахуванням певних вимог для коректного розв'язання задачі.

Системну шумову температуру T_{sys} радіотелескопа можна розділити на дві складові за ознакою їх походження, внутрішню (або власну) шумову температуру T_{int} , джерела якої містяться у середині радіотелескопа, та зовнішню T_{ext} , джерела якої розподілені у зовнішньому просторі, що оточує радіотелескоп. Оскільки шуми від внутрішніх і зовнішніх джерел є некорельованими, T_{sys} можна записати як суму

$$T_{sys} = T_{int} + T_{ext}. \quad (2.7)$$

Оскільки обидві шумові температури, T_{int} і T_{ext} , залежать від частоти, співвідношення між ними може набувати дуже різних значень у різних

частотних діапазонах. На метрових і декаметрових хвилях, де працюють НЧ радіотелескопи, зазвичай T_{ext} домінує над T_{int} , тому для оцінки цього домінування ввели спеціальну величину SND (Sky Noise Dominance [61])

$$SND = \frac{T_{ext}}{T_{int}} = \frac{T_{ext\,eff}}{T_{int\,eff}}, \quad (2.8)$$

який кількісно визначає перевищення зовнішньої температури антени над внутрішньою температурою.

Використовуючи (2.8) можна перетворити формулу (2.5) для SEFD до такого вигляду

$$SEFD = \frac{k_B(T_{int\,eff} + T_{ext\,eff})}{A_e} = \frac{2k_B T_{sky}}{A_e} \left(1 + \frac{1}{SND}\right). \quad (2.9)$$

Ця формула свідчить про те, що для розрахунку зовсім не обов'язково знати абсолютні значення шумових температур T_{int} і T_{ext} , а достатньо знати лише їх співвідношення, яке визначається параметром SND.

Таким чином, ми з'ясували, що для оцінки чутливості НЧ радіотелескопів здебільше використовується їх флуктуаційна чутливість ΔS_{min} (2.6), яка визначається двома незалежними чинниками – величиною SEFD, що є апаратною її складовою, та множника $1/\sqrt{\Delta f \Delta t n}$, який визначається лише параметрами спостережень. Роль останнього чинника у підвищенні чутливості НЧ радіотелескопа ми розглянемо у наступних розділах. А в цьому розділі візьмемо собі за мету дослідити апаратну чутливість НЧ радіотелескопа, яка визначається параметром SEFD. Для цього ми побудуємо математичні моделі субрешітки радіотелескопа ГУРТ та її елемента, та з'ясуємо, як їх параметри впливають на апаратну чутливість радіотелескопа.

2.2 Математична модель активної антени, що використовується як елемент субрешітки АФАР ГУРТ

Розглянемо приймальну активну антену (рис. 2.1, а), що складається з дротового диполя та підключеного до його клем малошумного підсилювача (МШП), вихід якого навантажено на лінію передачі з хвильовим опором Z_w .

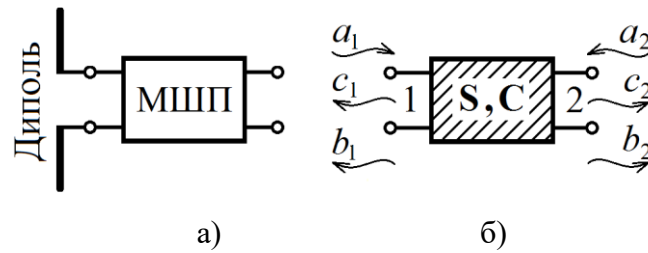


Рис. 2.1. Активна антена (а) як чотириполіусник (б).

Поставимо у відповідність активній антені шумний чотириполіусник (рис. 2.1, б), рівняння якого має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{b}_1 &= S_{11}\dot{a}_1 + S_{12}\dot{a}_2 + \dot{c}_1; \\ \dot{b}_2 &= S_{21}\dot{a}_1 + S_{22}\dot{a}_2 + \dot{c}_2, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де S_{mn} ($m, n=1, 2$) – елементи матриці розсіювання чотириполіусника; \dot{a}_1, \dot{a}_2 та \dot{b}_1, \dot{b}_2 – комплексні нормовані амплітуди падаючих та відбитих гармонічних хвиль на його вході та виході; \dot{c}_1, \dot{c}_2 – комплексні амплітуди шумових хвиль, що виходять з чотириполіусника, джерела яких знаходяться всередині активної антени. Природно вважати, що шумових хвиль мають нульові середні значення ($\overline{\dot{c}_{1,2}} = 0$), а їх спектральні густини характеризуються коваріаційною матрицею

$$C = \begin{pmatrix} \overline{\dot{c}_1 \dot{c}_1^*} & \overline{\dot{c}_1 \dot{c}_2^*} \\ \overline{\dot{c}_1 \dot{c}_2^*} & \overline{\dot{c}_2 \dot{c}_2^*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Будемо вважати, що ця антена працює у приймальному режимі і збуджується плоскою електромагнітною хвилею, що поширюється у

вільному просторі та надходить з напрямку (θ, φ) . Припустимо також, що поляризація плоскої хвилі узгоджена з поляризацією диполя. У такому випадку амплітуда \dot{a}_1 біжучої хвилі у лінії передачі у перетині вхідних клем чотириполюсника (рис. 2.1, б) визначається за формулою [74]:

$$\dot{a}_1 = -j\lambda \frac{\dot{E}^i}{\sqrt{2Z_0}} \sqrt{\frac{D_m}{4\pi}} F(\theta, \varphi) \quad (2.12)$$

де \dot{E}^i – амплітуда напруженості електричного поля плоскої електромагнітної хвилі; та Z_0 – його характеристичний опір; $F(\theta, \varphi)$ – нормована діаграма направленості диполя, а D_m та $A_{em} = D_m \lambda^2 / 4\pi$ – КНД та ефективна площа диполя у напрямку максимуму головного променя.

Потужність сигналу P_2 на виході чотириполюсника, яку він віддає у узгоджене навантаження, легко визначити з (2.10)

$$P_2 = |\dot{b}_2|^2 = |S_{21}|^2 |\dot{a}_1|^2 = \kappa P_1 \quad (2.13)$$

де P_1 – потужність сигналу, що відбирається антеною у надхідної плоскої хвилі й поступає на вхід чотириполюсника:

$$P_1 = |\dot{a}_1|^2 = W^i \frac{\lambda^2}{4\pi} D_m |F(\theta, \varphi)|^2 = W^i A_{em} |F(\theta, \varphi)|^2, \quad (2.14)$$

$W^i = |\dot{E}^i|^2 / 2Z_0$ – густина потоку потужності плоскої електромагнітної хвилі.

З (2.13) випливає, що величина, позначена як $\kappa = |S_{21}|^2$ є коефіцієнтом передачі активної антени за потужністю, бо зв'язує між собою вхідну і вихідну потужності P_1 і P_2 , відповідно. Ще одну властивість цього коефіцієнта можна визначити у такий спосіб. Запишемо потужність P_2 (2.13) через еквівалентний коефіцієнт підсилення активної антени G_e :

$$P_2 = W^i \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{em} |F(\theta, \varphi)|^2. \quad (2.15)$$

Відомо, що G_e на відміну від традиційного (абсолютного) коефіцієнта підсилення G враховує не тільки втрати в антені, а ще й розузгодженість її з навантаженням. Тепер запишемо (2.13) з урахуванням (2.14) у вигляді

$$P_2 = W^i \frac{\lambda^2}{4\pi} \kappa D_m |F(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.16)$$

Зіставляючи рівняння (2.15) і (2.16) отримуємо співвідношення

$$G_{em} = \kappa D_m, \quad (2.17)$$

З якого випливає, що коефіцієнт κ зв'язує між собою два важливі параметри активної антени, еквівалентний коефіцієнт підсилення і КНД.

Потужність власного шуму P_{2int} на виході активної антени відповідно до (2.11) дорівнює

$$P_{2int} = \Delta f C_{22}, \quad (2.18)$$

де Δf – ширина смуги частот приймача ($\Delta f \ll f$).

Потужності шуму P_{2int} можна поставити у відповідність шумову температуру T_{2int} : $P_{2int} = k_B \Delta f T_{2int}$, яка згідно (2.18) буде дорівнювати $T_{2int} = C_{22} / k_B$.

З рівнянь (2.14) – (2.18) випливає, що для оцінки потужностей сигналу P_2 та власного шуму P_{2int} на виході активної антени потрібно знати тільки два параметри чотириполюсника: S_{21} та C_{22} . Визначимо ці параметри, для чого уявимо чотириполюсник (рис. 2.1, б), еквівалентний усій активній антені, у вигляді каскадного з'єднання двох чотириполюсників (рис. 2.2), один з яких (I) поставимо у відповідність диполю, а інший (II) – МШП.

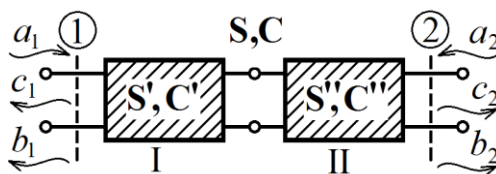


Рис. 2.2. Декомпозиція чотириполюсника, еквівалентного активній антені (рис. 2.1, б).

Будемо вважати, що обидва ці чотириполіусники є лінійними та описуються матрицями розсіювання S' та S'' , відповідно; окрім того вони містять у собі джерела флуктуаційних шумів, які ми будемо характеризувати коваріаційними матрицями спектральних густин шумових хвиль C' та C'' . Матриця розсіювання S' чотириполіусника I (рис. 2.2), який відповідає диполі, може бути визначена, як [137]:

$$S' = \frac{1}{z+1} \begin{pmatrix} z+1-2r_\Sigma & 2\sqrt{r_\Sigma} \\ 2\sqrt{r_\Sigma} & z-1 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

де $z = r + jx = r_\Sigma + r_d + jx$ – вхідний опір диполя, нормований відносно хвильового опору лінії передачі $z = Z/Z_w$, а r_Σ , r_d та x – його складові, нормовані опір випромінювання r_Σ , опір втрат r_d та реактанс x .

Джерелами шумів у диполі можуть бути омичні втрати енергії як у матеріалі, з якого він виготовлений, так і у близько розташованій землі з частковою провідністю, яка є невід'ємною його частиною. Всі ці втрати у диполі відображені у його матриці розсіювання S' , тому його коваріаційна матриця C' може бути визначена, як [75]:

$$C' = k_B T_0 (E - S' S'^*) = k_B T_0 \frac{4r_d}{|z+1|^2} \begin{pmatrix} r_\Sigma & -\sqrt{r_\Sigma} \\ -\sqrt{r_\Sigma} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Де T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Чотириполіусник II (рис. 2.2) являє собою лінійний МШП на біполярних транзисторах, принципова електрична схема якого нам відома, тому матриці S'' та C'' , що описують його параметри, легко визначити, використовуючи відомі комп'ютерні програми, призначені для моделювання електронних пристроїв.

Тепер, вважаючи, що всі матриці, які описують параметри чотириполіусників I та II (рис. 2.2), нам відомі, нескладно знайти [76] матриці S та C об'єднаного чотириполіусника (рис. 2.1, б), у яких нам знадобляться лише параметри S_{21} та C_{22}

$$S_{21} = \frac{S'_{21}S''_{21}}{1 - S''_{11}S'_{22}}; \quad (2.21)$$

$$C_{22} = C''_{22} + \left| \frac{S''_{21}S'_{22}}{1 - S''_{11}S'_{22}} \right|^2 C''_{11} + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{S''_{21}S'_{22}C''_{12}}{1 - S''_{11}S'_{22}} \right) + \left| \frac{S''_{21}}{1 - S''_{11}S'_{22}} \right|^2 C'_{22}. \quad (2.22)$$

Підставляючи до них елементи матриць S' C' з (2.19) і (2.20), знаходимо

$$\kappa = |S_{21}|^2 = \frac{r_\Sigma}{r} \frac{4r}{|z+1|^2} \frac{1 - |S''_{11}|^2}{\left| 1 - S''_{11} \frac{z-1}{z+1} \right|^2} \frac{|S''_{21}|^2}{1 - |S''_{11}|^2} = \eta \chi K_P; \quad (2.23)$$

$$C_{22} = C''_{22} + \left| \frac{z-1}{z+1} K_U \right|^2 C''_{11} + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{z-1}{z+1} K_U C''_{12} \right) + k_B T_0 \frac{4r_d}{|z+1|^2} |K_U|^2, \quad (2.24)$$

де $\eta = r_\Sigma / r$ – ККД диполя; $K_U = S''_{21} / (1 - S''_{11}S'_{22})$ – коефіцієнт передачі МШП за напругою, K_P – коефіцієнт підсилення МШП за потужністю

$$K_P = |S''_{21}|^2 / (1 - |S''_{11}|^2); \quad (2.25)$$

χ – коефіцієнт імпедансного розузгодження диполя з МШП:

$$\chi = \frac{1 - |S'_{22}|^2}{|1 - S''_{11}S'_{22}|} \cdot \frac{1 - |S''_{11}|^2}{|1 - S'_{22}S''_{11}|} = \frac{4r}{|z+1|^2} \frac{1 - |S''_{11}|^2}{\left| 1 - S''_{11} \frac{z-1}{z+1} \right|^2}, \quad (2.26)$$

який може приймати значення від 0, коли вся потужність P_1 відбивається від входу диполя ($S'_{22} = 1$), або МШП ($S''_{11} = 1$), до 1, коли вся потужність з виходу диполю подається на вхід МШП без відбиття ($S''_{11} = S'^*_{22}$).

З (2.23) випливає, що коефіцієнт передачі активної антени κ може бути визначений, як добуток трьох множників: ККД диполя η , коефіцієнта підсилення МШП за потужністю K_P та коефіцієнта розузгодженості χ , тобто він враховує всі перетворення сигналу у активній антені, як його ослаблення через наявність в ній втрат та розузгодженості, так і його підсилення за допомогою МШП.

2.3 Математична модель субрешітки

Узагальнимо математичну модель елемента АФАР ГУРТ на математичну модель її субрешітки.

Будемо вважати, що субрешітка працює в режимі малого сигналу, коли всі її елементи й її саму можна вважати лінійними пристроями. В такому разі ми можемо поставити її у відповідність прохідний багатополіусник (БП, рис. 2.3) з N входами та одним виходом ($N + 1$). Будемо вважати, що вихід БП (переріз “ γ ”) співпадає з реальним виходом субрешітки, до якого підключена лінія передачі з хвильовим опором Z_w , котра з’єднує її з приймачем. N входів цього БП (переріз “ α ”) здійснюють зв’язок субрешітки із зовнішнім простором, поділеним на N уявних ортогональних каналів [74], [75].

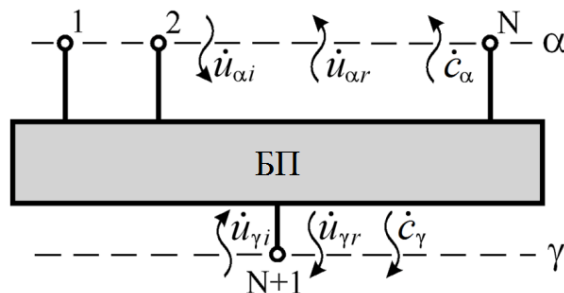


Рис. 2.3. Багатополіусник, що є еквівалентним субрешітці.

Враховуючи, що даний БП містить у собі внутрішні джерела шуму, напишемо його рівняння у такому вигляді

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\alpha r} &= S_{\alpha\alpha} \dot{u}_{\alpha i} + S_{\alpha\gamma} \dot{u}_{\gamma i} + c_{\alpha}; \\ \dot{u}_{\gamma r} &= \langle S_{\gamma\alpha} \dot{u}_{\alpha i} \rangle + S_{\gamma\gamma} \dot{u}_{\gamma i} + c_{\gamma}, \end{aligned} \quad (2.27)$$

де $S_{\alpha\alpha}$, $\langle S_{\gamma\alpha}$, $S_{\alpha\gamma} \rangle$ та $S_{\gamma\gamma}$ – блоки матриці розсіювання S БП; $\dot{u}_{\alpha i}$ та $\dot{u}_{\alpha r}$ – матриці-стовпці нормованих амплітуд падаючих і відбитих гармонічних хвиль на входах БП відповідно; $\dot{u}_{\gamma i}$ та $\dot{u}_{\gamma r}$ – нормовані амплітуди падаючої та відбитої гармонічних хвиль на виході БП; c_{α} та c_{γ} – нормовані амплітуди вихідних флуктуаційних шумових хвиль на входах та

виходах БП, відповідно. Тут і далі для позначення матриць використовуються такі символи: \mathbf{B} – квадратна матриця, $b\rangle$ – матриця-стовпець, $\langle b$ – матриця-рядок.

Будемо вважати, що амплітуди шумових хвиль мають нульові середні значення ($\overline{c_\alpha} = 0$, $\overline{c_\gamma} = 0$), а їхні енергетичні параметри характеризуються коваріаційною матрицею спектральних густин:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\alpha\alpha} & \mathbf{C}_{\alpha\gamma} \\ \langle \mathbf{C}_{\gamma\alpha} & \mathbf{C}_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{c_\alpha \langle c_\alpha^*} & \overline{c_\alpha \langle c_\gamma^*} \\ \overline{c_\gamma \langle c_\alpha^*} & \overline{c_\gamma \langle c_\gamma^*} \end{pmatrix}. \quad (2.28)$$

Елемент $\mathbf{C}_{\gamma\gamma}$ характеризує потужність вихідного власного шуму, що віддається субрешіткою в узгоджену лінію передачі, яка йде до приймача

$$P_{\gamma int} = \Delta f \mathbf{C}_{\gamma\gamma}. \quad (2.29)$$

Для повного опису БП (рис. 2.3), еквівалентного всій субрешітці, необхідно знати обидві його матриці, \mathbf{S} та \mathbf{C} . Визначимо ці матриці, для чого уявимо БП (рис. 2.3) каскадним з'єднанням двох багатополіусників (рис. 2.4), перший з яких (БП-I) відповідає N -елементній решітці диполів, а другий (БП-II) – діаграмоутворювальній схемі (ДС), що включає всі МШП, дискретні фазообертачі та суматор.

Опишемо багатополіусник БП-I матрицями \mathbf{S}' та \mathbf{C}' , а БП-II – матрицями \mathbf{S}'' та \mathbf{C}'' . Знаючи ці матриці, нескладно знайти матриці \mathbf{S} та \mathbf{C} об'єднаного БП, використавши наведені у [76] формули:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha} & \mathbf{S}_{\alpha\gamma} \\ \mathbf{S}_{\gamma\alpha} & \mathbf{S}_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}'_{\alpha\alpha} + \mathbf{G}_{12} \mathbf{S}''_{\beta\beta} \mathbf{S}'_{\beta\alpha} & \mathbf{G}_{12} \mathbf{S}''_{\beta\gamma} \\ \mathbf{G}_{21} \mathbf{S}'_{\beta\alpha} & \mathbf{S}''_{\gamma\gamma} + \mathbf{G}_{21} \mathbf{S}'_{\beta\beta} \mathbf{S}''_{\beta\gamma} \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

та

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\alpha\alpha} & \mathbf{C}_{\alpha\gamma} \\ \mathbf{C}_{\gamma\alpha} & \mathbf{C}_{\gamma\gamma} \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

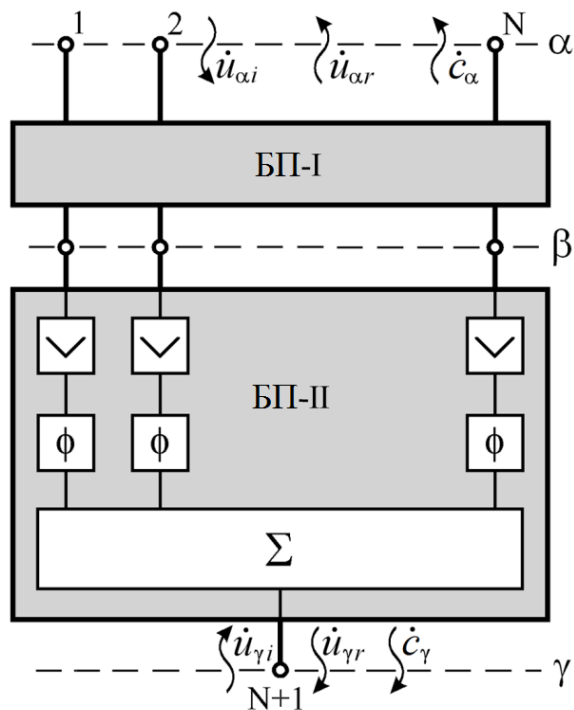


Рис. 2.4. Блок-схема субрешітки як з'єднання двох БП.

де

$$\begin{aligned}
 C_{\alpha\alpha} &= C'_{\alpha\alpha} + G_{11}C'_{\beta\alpha} + C'_{\alpha\beta}G_{11t}^* + G_{11}C'_{\beta\beta}G_{11t}^* + G_{12}C''_{\beta\beta}G_{12t}^*; \\
 C_{\alpha\gamma} &= G_{12}C''_{\beta\gamma} + C'_{\alpha\beta}G_{21t}^* + G_{11}C'_{\beta\beta}G_{21t}^* + G_{12}C''_{\beta\beta}G_{22t}^*; \\
 C_{\beta\gamma} &= G_{21}C'_{\beta\alpha} + C''_{\gamma\beta}G_{12t}^* + G_{21}C'_{\beta\beta}G_{11t}^* + G_{22}C''_{\beta\beta}G_{12t}^*; \\
 C_{\gamma\gamma} &= C''_{\gamma\gamma} + G_{22}C''_{\beta\gamma} + C''_{\gamma\beta}G_{22t}^* + G_{22}C''_{\beta\beta}G_{22t}^* + G_{21}C'_{\beta\beta}G_{21t}^*; \\
 G &= \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{12}S''_{\beta\beta} & S'_{\alpha\beta}(E - S''_{\beta\beta}S'_{\beta\beta})^{-1} \\ S''_{\gamma\beta}(E - S'_{\beta\beta}S''_{\beta\beta})^{-1} & G_{21}S'_{\beta\beta} \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Знайдемо матриці S' та C' БП-I, що еквівалентний дипольній решітці. Цілком очевидно, що N входів БП-I, що розташовані у перерізі “ α ” є тими ж самими, що у об'єднаного БП, який відповідає всій субрешітці. Щодо N виходів БП-I, розташованих у перерізі “ β ”, будемо вважати, що вони співпадають з реальним клемами диполів, до яких підключені фідерні лінії із заданим хвильовим опором Z_w .

За вихідні дані для математичного опису БП-I візьмемо параметри антенної решітки, які можна визначити за допомогою її електродинамічного моделювання. До таких параметрів відносяться матриця власних та взаємних імпедансів \mathbf{Z} антенної решітки, а також її N векторних нормованих парціальних ДН $\vec{F}_n(\theta, \varphi)$ та N парціальних коефіцієнтів підсилення G_n , які визначаються при збудженні входу n -го диполу субрешітки, у той час як входи інших її диполів ($m=1, \dots, N, m \neq n$) перебувають у розімкненому стані.

Рівняння, що пов'язує нормовані комплексні амплітуди падаючих $\dot{u}_{\alpha i}$, $\dot{u}_{\beta i}$ та відбитих $\dot{u}_{\alpha r}$, $\dot{u}_{\beta r}$ хвиль на входах БП-I, напишемо у такому вигляді:

$$\begin{pmatrix} \dot{u}_{\alpha r} \\ \dot{u}_{\beta r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S'_{\alpha\alpha} & S'_{\alpha\beta} \\ S'_{\beta\alpha} & S'_{\beta\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_{\alpha i} \\ \dot{u}_{\beta i} \end{pmatrix} = \mathbf{S}' \begin{pmatrix} \dot{u}_{\alpha i} \\ \dot{u}_{\beta i} \end{pmatrix}, \quad (2.32)$$

де \mathbf{S}' – матриця розсіювання дипольної решітки, яку можна визначити за допомогою формули [75], [77]

$$\mathbf{S}' = \begin{pmatrix} S'_{\alpha\alpha} & S'_{\alpha\beta} \\ S'_{\beta\alpha} & S'_{\beta\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{J}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{J}_t^{-1} + \mathbf{J}_t^* \mathbf{J}_t^{-1} & \mathbf{J}^{-1} \mathbf{A} \\ \mathbf{A} \mathbf{J}_t^{-1} & \mathbf{E} - \mathbf{A} \end{pmatrix}, \quad (2.33)$$

де $\mathbf{A} = 2(\mathbf{z} + \mathbf{E})^{-1}$; \mathbf{z} – нормована матриця імпедансів антенної решітки, елементи якої пов'язані з елементами матриці \mathbf{Z} співвідношенням: $z_{nm} = Z_{nm} / Z_w$; \mathbf{E} – одинична матриця N -го порядку; \mathbf{J} – допоміжна квадратна матриця N -го порядку, яка визначається з матричного рівняння $\mathbf{J}_t^* \cdot \mathbf{r}_\Sigma \cdot \mathbf{J} = \mathbf{E}$; \mathbf{r}_Σ – нормована матриця опорів випромінювання антенної решітки, елементи якої визначаються за формулою $r_{\Sigma mn} = \oint_{4\pi} \vec{f}_m^* \cdot \vec{f}_n d\Omega$; $d\Omega$ – елемент тілесного кута; $\vec{f}_n(\theta, \varphi) = \sqrt{G_n r_{nn} / 4\pi} \cdot \vec{F}_n(\theta, \varphi)$; $r_{nn} = \text{Re}(z_{nn})$. Тут і далі $_t$ та * означають знаки транспонування та комплексного спряження відповідно.

Будемо вважати, що антенна решітка працює у приймальному режимі та єдиним джерелом її збудження є плоска електромагнітна хвиля з

напруженістю електричного поля $\dot{\vec{E}}^i$, яка надходить з напрямку (θ, φ) . Тоді падаючі хвилі у каналах вільного простору $\dot{u}_{\alpha i}$ (рис. 2.4), що утворені цією плоскою хвилею будуть визначатися як:

$$\dot{u}_{\alpha i} = -j\lambda \frac{1}{\sqrt{2Z_0}} \mathbf{J}_t \dot{\vec{E}}^i \cdot \vec{f}(\theta, \varphi), \quad (2.34)$$

де λ – довжина хвилі у вільному просторі, а Z_0 – його характеристичний опір.

БП-I є пасивним БП, тому для знаходження його матриці \mathbf{C}' можна застосувати теорему Босма [78], що і зроблено у роботі [79], де для коваріаційної матриці шумових хвиль антенної решітки отримано таке співвідношення:

$$\mathbf{C}' = \begin{pmatrix} \mathbf{C}'_{\alpha\alpha} & \mathbf{C}'_{\alpha\beta} \\ \mathbf{C}'_{\beta\alpha} & \mathbf{C}'_{\beta\beta} \end{pmatrix} = k_B T_0 (\mathbf{E} - \mathbf{S}' \mathbf{S}_t'^*) = \begin{pmatrix} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{V} (\mathbf{J}_t^*)^{-1} & \mathbf{J}^{-1} \mathbf{V} \\ \mathbf{V} (\mathbf{J}_t^*)^{-1} & \mathbf{V} \end{pmatrix}, \quad (2.35)$$

де $\mathbf{V} = k_B T_0 \mathbf{A} \mathbf{r}_d \mathbf{A}_t^*$; $\mathbf{r}_d = \mathbf{r} - \mathbf{r}_\Sigma$ – нормована матриця опорів втрат антенної решітки.

Перейдемо тепер до БП-II, що є складеним БП. Він утворений з'єднанням чотиріполіусників, які представляють малoshумні підсилювачі та фазообертачі, а також $(N+1)$ -поліусника, що представляє суматор з N розв'язаними входами та одним виходом. Розглянемо по черзі всі ці пристрої.

МШП являє собою підсилювач з великим динамічним діапазоном (коефіцієнт інтермодуляційних спотворень 3-го порядку $\text{Ir}_3 > 90$ дБ/мкВ [25]), що працює в режимі малого сигналу, тому йому можна поставити у відповідність лінійний чотиріполіусник, який характеризується матрицею розсіювання \mathbf{S}_y та коваріаційною матрицею шумів \mathbf{C}_y :

$$\mathbf{S}_y = \begin{pmatrix} S_{y11} & S_{y12} \\ S_{y22} & S_{y21} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}_y = \begin{pmatrix} C_{y11} & C_{y12} \\ C_{y21} & C_{y22} \end{pmatrix}. \quad (2.36)$$

Оскільки принципова електрична схема МШП відома [25], обидві ці матриці неважко визначити, використовуючи відомі програми

комп'ютерного моделювання [80], які добре себе зарекомендували у світовій практиці.

Фазообертачі та суматор є пасивними пристроями, тому їх S -матриці можна знайти з їх матриць розсіювання, використовуючи теорему Босма. Тоді матриці, що визначають параметри цих пристроїв, матимуть такий вигляд:

– фазообертача, включеного у n -й канал ДС,

$$S_{\phi n} = \begin{pmatrix} 0 & \Phi_n \\ \Phi_n & 0 \end{pmatrix}; \quad C_{\phi n} = k_B T_0 \begin{pmatrix} 1 - \eta_{\phi n} & 0 \\ 0 & 1 - \eta_{\phi n} \end{pmatrix}, \quad (2.37)$$

де $\Phi_n = \sqrt{\eta_{\phi n}} e^{-j\phi_n}$; ϕ_n – фазовий кут, що додається фазообертачем у фідер; $\eta_{\phi n}$ – ККД цього фазообертача;

– рівноплечого суматора з N узгодженими та розв'язаними входами та єдиним виходом

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\eta_{\Sigma}}{N}} \begin{pmatrix} \mathbf{0} & 1 \rangle \\ \langle 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad C_{\Sigma} = k_B T_0 \begin{pmatrix} \mathbf{E} - \frac{\eta_{\Sigma}}{N} \cdot \mathbf{1} & 0 \rangle \\ \langle 0 & 1 - \eta_{\Sigma} \end{pmatrix}, \quad (2.38)$$

де η_{Σ} – ККД суматора; $\mathbf{1}$ – квадратна матриця, $1 \rangle$ – матриця-стовпець та $\langle 1$ – матриця-рядок, усі елементи яких дорівнюють одиниці.

Знаючи схему з'єднання пристроїв, які містяться у ДС [25], знаходимо матриці S'' та C'' всього БП-II за допомогою формул (2.30) та (2.31). У результаті маємо:

$$S'' = \begin{pmatrix} S''_{\beta\beta} & S''_{\beta\gamma} \rangle \\ \langle S''_{\gamma\beta} & S''_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{y11} \mathbf{E} & S_{y12} \sqrt{\eta_{\Sigma}/N} \cdot \Phi \rangle \\ \langle \Phi \cdot S_{y12} \sqrt{\eta_{\Sigma}/N} & S_{y22} \sum_{n=1}^N \Phi_n^2 \eta_{\Sigma}/N \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

та

$$C'' = \begin{pmatrix} C''_{\beta\beta} & C''_{\beta\gamma} \rangle \\ \langle C''_{\gamma\beta} & C''_{\gamma\gamma} \end{pmatrix}, \quad (2.40)$$

де

$$\mathbf{C}_{\beta\beta}'' = C_{y11} \mathbf{E} + |S_{y12}|^2 \mathbf{H}; \quad \langle C_{\gamma\beta}'' = \langle \Phi \left(C_{y21} \mathbf{E} + |S_{y22}|^2 \mathbf{H} \right) \sqrt{\frac{\eta_\Sigma}{N}}; \quad$$

$$C_{\beta\gamma}'' \rangle = (\langle C_{\gamma\beta}'' \rangle_t)^*;$$

$$C_{\gamma\gamma}'' = k_B T_0 (1 - \eta_\Sigma \eta_\phi) + k_B T_0 |S_{y22}|^2 \eta_\Sigma \left(\eta_\phi - \frac{\eta_\Sigma}{N} \left| \sum_{n=1}^N \Phi_n^2 \right|^2 \right) + C_{y22} \eta_\Sigma \eta_\phi;$$

$$H_{mn} = \begin{cases} 1 - \frac{\eta_\Sigma \eta_{\phi n}}{N}, & m = n; \\ -\frac{\eta_\Sigma}{N} \sqrt{\eta_{\phi m} \eta_{\phi n}} e^{j(\phi_n - \phi_m)}, & m \neq n. \end{cases}$$

Тепер, коли визначено параметри БП-I і БП-II (рис. 2.5), нескладно знайти матрицю розсіювання \mathbf{S} об'єднаного БП, еквівалентного до всієї субрешітки, також використавши формули з [81]. У матриці, яка матиме такий вигляд

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{\alpha\alpha} & S_{\alpha\gamma} \rangle \\ \langle S_{\gamma\alpha} & S_{\gamma\gamma} \end{pmatrix}, \quad (2.41)$$

нам знадобиться лише один блок $\langle S_{\gamma\alpha}$ для розрахунку амплітуди хвилі $\dot{u}_{\gamma r}$, що біжить у бік навантаження:

$$\dot{u}_{\gamma r} = \langle S_{\gamma\alpha} \dot{u}_{\alpha i} \rangle = \frac{-j\lambda \dot{E}^i}{\sqrt{2Z_0}} \langle i_e \cdot \mathbf{f}(\theta, \phi) \rangle, \quad (2.42)$$

де $\langle i_e$ – матриця-рядок, що визначає еквівалентний розподіл струму на входах елементів субрешітки у приймальному режимі

$$\langle i_e = -j \frac{S_{y21}}{\sqrt{N}} \langle e^{-j\gamma_n} [\mathbf{E} - (\mathbf{E} - \mathbf{A}) S_{y11}]^{-1} \mathbf{A} \quad (2.43)$$

Формула (2.42) записана в припущенні, що поляризація ДН диполів решітки співпадає з поляризацією надхідної плоскої хвилі.

З (2.43) неважко отримати нормовану ДН субрешітки :

$$F(\theta, \varphi) = \langle i_e \cdot f(\theta, \varphi) \rangle / \langle i_e \cdot f(\theta_{\max}, \varphi_{\max}) \rangle, \quad (2.44)$$

де $(\theta_{\max}, \varphi_{\max})$ – напрям її головного максимуму.

З (2.23) також можна знайти потужність у навантаженні субрешітки, як [75], [82]

$$P_\gamma = |\dot{u}_{\gamma r}|^2 = W^i \lambda^2 |\langle i_e f(\theta, \varphi) \rangle|^2, \quad (2.45)$$

де W^i – густина потоку потужності надхідної плоскої хвилі.

Запишемо (2.45) у такому наступному вигляді

$$P_\gamma = W^i \frac{\lambda^2}{4\pi} G_e = W^i \frac{\lambda^2}{4\pi} \kappa D, \quad (2.46)$$

де G_e є еквівалентним КП субрешітки [83]

$$G_e(\theta, \varphi) = 4\pi |\langle i_e f(\theta, \varphi) \rangle|^2; \quad (2.47)$$

D – її КНД:

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{|\langle i_e f(\theta, \varphi) \rangle|^2}{\langle i_e^* \mathbf{r}_\Sigma i_e \rangle} \quad (2.48)$$

і пов'язана з ним її ефективна площа [84]

$$A_e(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} D(\theta, \varphi) = \lambda^2 \frac{|\langle i_e f(\theta, \varphi) \rangle|^2}{\langle i_e^* \mathbf{r}_\Sigma i_e \rangle}; \quad (2.49)$$

κ – коефіцієнт передачі субрешітки

$$\kappa = \langle i_e^* \mathbf{r}_\Sigma i_e \rangle; \quad (2.50)$$

який, як і у випадку активної антени (2.23), може бути розкладений на три множники, ККД субрешітки η , коефіцієнт імпедансної розузгодженості χ множини диполів і множини МШП та коефіцієнт підсилення МШП за потужністю K_p . Звичайно, що коефіцієнт підсилення МШП K_p буде таким

самим, як і в одиночній активній антені (2.25), яка використовується як елемент субрешітки. Інші множники являють собою окремі параметри субрешітки і можуть бути розраховані за формулами [85]:

$$\eta = \frac{\langle i_e^* \mathbf{r}_\Sigma i_e \rangle}{\langle i_e^* \mathbf{r} i_e \rangle}; \quad (2.51)$$

$$\chi = \frac{\langle i_e^* \mathbf{r} i_e \rangle}{K_p} \quad (2.52)$$

Варто зауважити, що субрешітка з нехтовно малими зв'язками між її елементами має такий самий коефіцієнт передачі κ , ККД η та коефіцієнт імпедансної розузгодженості χ , як її ізольований активний елемент. Це достатньо просто довести, якщо матриці опорів \mathbf{z} і \mathbf{r}_Σ , що входять до (2.50) та (2.43), уявити діагональними [86].

Тепер за допомогою співвідношень (2.31) знаходимо елемент $C_{\gamma\gamma}$ шумової матриці об'єднаного БП (рис. 2.4):

$$C_{\gamma\gamma} = C_{\gamma\gamma}'' + \mathbf{G}_{22} C_{\beta\gamma}'' + \langle C_{\gamma\beta}'' \mathbf{G}_{22}^* \rangle + \langle \mathbf{G}_{22} C_{\beta\beta}'' \mathbf{G}_{22}^* \rangle + \langle \mathbf{G}_{21} C_{\beta\beta}' \mathbf{G}_{21}^* \rangle, \quad (2.53)$$

де

$$\langle \mathbf{G}_{21} = \langle S_{\gamma\beta}'' (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{\beta\beta}' \mathbf{S}_{\beta\beta}'')^{-1}; \quad \langle \mathbf{G}_{22} = \langle S_{\gamma\beta}'' (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{\beta\beta}' \mathbf{S}_{\beta\beta}'')^{-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}'.$$

В свою чергу, використавши (2.29), можна визначити потужність власного шуму $P_{\gamma int}$ на виході субрешітки, а також шумову температуру, що асоціюється з нею

$$T_{\gamma int} = C_{\gamma\gamma} / k_B. \quad (2.54)$$

Таким чином ми отримали вирази для всіх основних енергетичних та шумових параметрів субрешітки, що і складають її математичну модель.

2.4 Визначення шумової температури системи та чутливості елементів НЧ радіотелескопа

Відомо, що на виході антенної системи, окрім прийнятого сигналу та власного шуму, присутній ще й шум, який вона приймає із зовнішнього простору. Зазвичай вважається [50], що джерелом такого шуму є фонове галактичне випромінювання, котре є неполяризованим, а його густина потоку потужності визначається законом Релея–Джинса: $W_{sky} = 2k_B T_{sky} \Delta f / \lambda^2$. Тут T_{sky} – яскравісна температура неба (К), яку ми будемо вважати рівномірно розподіленою на небесній сфері. Таке припущення зазвичай застосовується у літературі, спрямованій на дослідження чутливості радіотелескопів [7, 83, 88]. Для розрахунку яскравісної температури T_{sky} можна скористатися відомою формулою [87]

$$T_{sky} = 4 \cdot 10^5 (f \cdot 10^{-7})^{-2.56}. \quad (2.55)$$

На це шумове випромінювання будь-яка антена реагує як на зовнішній сигнал, тому для розрахунку потужності зовнішнього шуму P_{2ext} на виході приймальної антени, можна застосувати формулу (2.13), пам'ятаючи при цьому, що шумове випромінювання приходить не з фіксованого напрямку (θ, φ) , а рівномірно розподілене на всій небесній сфері:

$$\begin{aligned} P_{2ext} &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi W_{sky} \frac{\lambda^2}{4\pi} \kappa D_m |F(\theta, \varphi)|^2 d\theta d\varphi = \\ &= \frac{1}{2} \frac{2k_B T_{sky} \Delta f}{\lambda^2} \lambda^2 \kappa D_m \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 d\theta d\varphi = k_B \Delta f T_{sky} \kappa. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Множник $1/2$, що стоїть перед інтегралом, вказує, що антена лінійної поляризації взаємодіє тільки з половиною потоку неполяризованого

зовнішнього шуму. Зауважимо також, що ця формула отримана з використанням відомого співвідношення між ДН антени та її КНД [72]

$$D_m = 4\pi \int_0^\pi \int_0^{2\pi} |F(\theta, \varphi)|^2 d\theta d\varphi. \quad (2.57)$$

Потужність зовнішнього шуму на виході активної антени P_{2ext} можна виразити через відповідну їй шумову температуру T_{2ext} :

$$P_{2ext} = k_B \Delta f T_{sky} \kappa = k_B \Delta f T_{2ext} \quad (2.58)$$

і отримати для її розрахунку просту формулу:

$$T_{2ext} = \kappa T_{sky}. \quad (2.59)$$

Таким чином, температура зовнішнього шуму на виході приймальної активної антени залежить тільки від одного її параметра – коефіцієнта передачі κ та не залежить від інших її параметрів, зокрема ефективної площі.

Повна (системна) шумова температура T_{2sys} на виході активної антени визначається сумою $T_{2sys} = T_{2ext} + T_{2int}$.

Неважко довести, що для розрахунку потужності зовнішнього шуму $P_{\gamma ext}$ на виході субрешітки можна застосувати таку саме формулу, як і для одинокої активної антени (2.58), що дає

$$P_{\gamma ext} = k_B \Delta f T_{\gamma ext}, \quad (2.60)$$

де

$$T_{\gamma ext} = \kappa T_{sky}. \quad (2.61)$$

Знаючи температури внутрішніх та зовнішніх шумів субрешітки, можна розрахувати системну шумову температуру на її виході

$$T_{\gamma sys} = T_{\gamma int} + T_{\gamma ext} = C_{\gamma\gamma} / k_B + \kappa T_{sky}. \quad (2.62)$$

Для оцінки шумових властивостей активних антенних решіток можна також застосовувати еквівалентні шумові температури [67], приведені з

виходу АФАР до входів її ДС (переріз β на рис.2.5) за допомогою співвідношення

$$T_{e\,sys,ext,int} = T_{\gamma\,sys,ext,int} / K_P^{BFN}, \quad (2.63)$$

де $K_P^{BFN} = K_P \eta_\phi \eta_\Sigma$ – коефіцієнти передачі ДС за потужністю.

Еквівалентні шумові температури не залежать від коефіцієнтів передачі ДС, тому їх зручно використовувати для порівняння субрешіток різних АФАР, ДС яких можуть помітно відрізнятися.

У радіоастрономії для оцінки чутливості приймальної системи часто використовується параметр SND (Sky Noise Dominance [61])

$$SND = \frac{T_{\gamma\,ext}}{T_{\gamma\,int}} = \frac{T_{e\,ext}}{T_{e\,int}}, \quad (2.64)$$

що оцінює перевищення зовнішньої температури антени над внутрішньою температурою. Чим вище SND, тим ближче чутливість даної антени до граничної, що визначається виключно зовнішніми шумами. Домогтися підвищення SND можна тільки шляхом зменшення внутрішньої шумової температури $T_{e\,int}$ активної антени, що, як правило, пов'язано з ускладненням МШП та/або його значним подорожчанням. У [59], [88] показано, що компромісним можна вважати значення $SND = 6$ дБ. Реалізація такого SND не вимагає надмірних зусиль, і, хоча й призводить до зростання системної температури активної антени, але не більш ніж на 25% у порівнянні з такою ж антеною без власних шумів. Зниження чутливості радіотелескопа через таке зростання $T_{e\,sys}$ нескладно компенсувати збільшенням часу інтегрування сигналу Δt (2.4) лише на 57%, що є цілком прийнятним для більшості радіоастрономічних спостережень.

Також ми можемо записати вираз для розрахунку нормованого співвідношення сигнал/шум на виході антени [61], що досліджується як

$$SNR = \frac{P_2/W^i}{(P_{2ext} + P_{2int})/k_B \Delta f} = \frac{A_e}{T_{2sys}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{D_m}{T_{sky} + C_{22}/(k_B \kappa)} |F(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.65)$$

Традиційним методом підвищення чутливості активної антени по критерію сигнал/шум є зниження її власної шумової температури T_{2int} , однак, тут є своя межа, яка досягається при $T_{2int} = 0$

$$SNR_{max} = \frac{A_e}{T_{2ext}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{D_m}{T_{2ext}} |F(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.66)$$

Зазначимо, що у (2.66) не входить коефіцієнт передачі к активної антени, тому SNR_{max} неможна підвищити а ні за рахунок підвищення коефіцієнта підсилення МШП, а ні за рахунок покращення узгодженості його з диполем.

Можна знайти відношення сигнал/шум, яке зручно виразити у термінах SEFD:

$$SNR = \frac{P_2}{P_{2sys}} = \frac{W^i A_{em}/\eta_A}{k_B \Delta f T_{2sys}} = \frac{SFD}{SEFD}, \quad (2.67)$$

де

$$SEFD = k_B \frac{T_{sky} + C_{22}/(\eta_T k_B)}{A_{em}/\eta_A}. \quad (2.68)$$

SEFD чисельно дорівнює спектральній густині потоку надхідної електромагнітної хвилі $SFD = W^i/\Delta f$, яка забезпечує $SNR = 1$. SEFD можна представити у вигляді суми $SEFD = SEFD_{sky} + SEFD_{int}$, де перший доданок $SEFD_{sky}$ відповідає SEFD ідеальної активної антени без втрат з безшумним підсилювачем ($T_{2int} = 0$)

$$SEFD_{sky} = \frac{\eta_A k_B T_{sky}}{A_e} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{k_B T_{sky}}{D_m}, \quad (2.69)$$

а доданок $SEFD_{int}$ визначає внесок у $SEFD$ власних шумів активної антени

$$SEFD_{int} = \frac{\eta_A C_{22}}{\eta_T A_{em}} = \frac{k_B T_{int}}{\chi A_{em}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{k_B T_{int}}{\eta_A \chi D_m}. \quad (2.70)$$

Якщо власні шуми активної антени настільки малі, що ними можна знехтувати у порівнянні із зовнішніми ($T_{int} \ll T_{ext}$), то $SEFD_{sky}$ є тією величиною, яка обмежує чутливість антени. Варто відзначити, що $SEFD_{sky}$ буде приблизно однаковий для елементів АФАР усіх сучасних НЧ радіотелескопів, оскільки в них використовуються подібні дипольні антени з майже однаковим КНД D_m , який складає в середньому $\sim 7-8$ дБ. Навпаки, внесок власних шумів $SEFD_{int}$ до $SEFD$ цілком визначається внутрішніми параметрами активної антени і для його зменшення, окрім очевидного зниження температури власного шуму активної антени T_{int} , слід збільшувати ККД диполя та покращувати його узгодження з МШП.

2.5 Числовий аналіз параметрів активного елемента АФАР ГУРТ

Методика оцінки чутливості активних антен що наведена у даному підрозділі була використана при дослідженнях характеристик елемента АФАР радіотелескопа ГУРТ [25], [89], [90].

Параметри диполя, необхідні для розрахунку SNR, обчислювалися методом електродинамічного моделювання [91] за допомогою програми 4NEC2X [92], яка дає можливість коректно враховувати складну конструкцію диполя та параметри підстилюючої землі. Параметри МШП були розраховані шляхом комп'ютерного моделювання з використанням однієї з версій програми Microwave Office [80].

На рис. 2.5, можна детально простежити частотний хід температур зовнішнього T_{2ext} (суцільна лінія) та власного T_{2int} (штрихова лінія) шуму на виході елементу АФАР ГУРТ. Тут же для порівняння наведені графіки частотних залежностей шумових температур T_{2xx} (штрихова лінія) та $T_{2кз}$ (штрих-пунктирна лінія) на тому ж виході, де перша з них відповідає розімкненим вхідним клемам МШП, а друга – короткозамкненим. Останні дві температури характеризують властивості елемента АФАР у граничних режимах роботи та легко піддаються вимірюванню. Ці шумові температури неважко знайти зі співвідношення: $T_{2(xx, кз)} = C_{2(xx, кз)} / k_B$, в якому величину $C_{2(xx, кз)}$ легко розрахувати за формулою (2.21), якщо прийняти $C'_{22} = 0$ та $S'_{22} = \pm 1$. За цієї умови формула (2.21) матиме вигляд:

$$C_{2(xx, кз)} = C''_{22} + \left| \frac{S''_{21}}{1 \mp S''_{11}} \right|^2 C''_{11} \pm 2 \operatorname{Re} \left(\frac{S''_{21}}{1 \mp S''_{11}} C''_{12} \right), \quad (2.71)$$

де верхній знак відповідає режиму холостого ходу, а нижній – режиму короткого замикання.

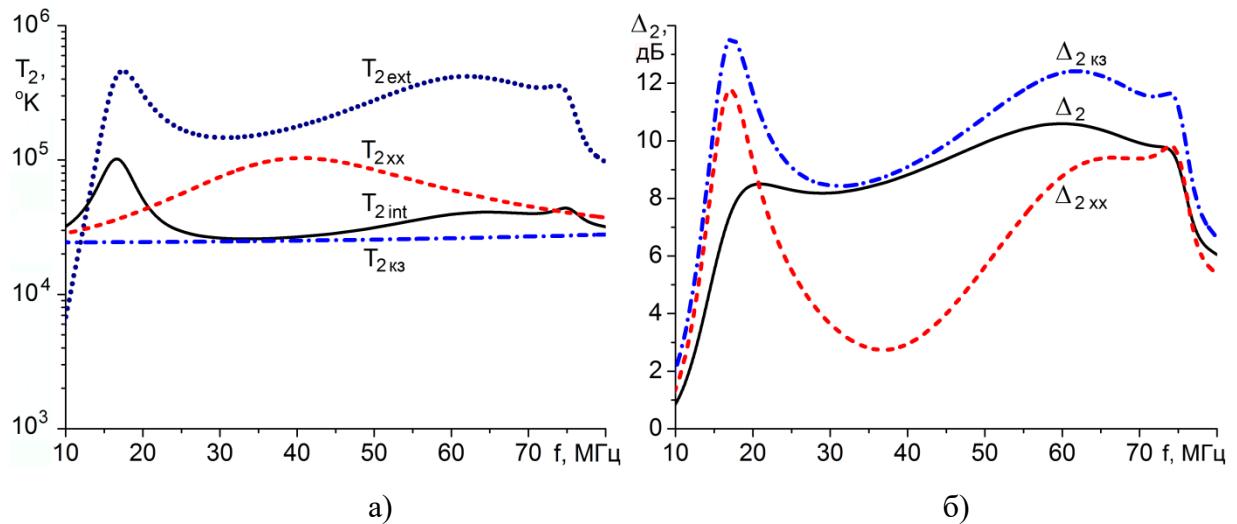


Рис. 2.5. Частотні залежності температур шуму T_2 (а) на виході елемента АФАР ГУРТ і відповідних перевищень Δ_2 (б).

З графіків, які наведені на рис. 2.5 а, випливає, що зовнішня шумова температура T_{2ext} перевищує T_{2int} , $T_{2кз}$ та T_{2xx} , майже у всьому робочому діапазоні частот (за виключенням смуги шириною у 2 МГц поблизу нижньої межі). Окрім того, у всьому діапазоні частот шумова температура МШП із короткозамкненим входом T_{2sc} менше, ніж з розімкнутим T_{2oc} , а температура шуму T_{2int} , що відповідає штатному режиму роботи елемента АФАР, у більшій частині робочого діапазону частот (21÷80 МГц) лежить поміж ними. Додаткову інформацію про властивості шумової температури на виході елемента АФАР можна отримати з рис. 2.5 б, де показані перевищення Δ_2 (у децибелах) температури шуму системи T_{2sys} над T_{2sc} та T_{2oc} , $\Delta_{2(int,oc,sc)} = 10\lg(T_{2sys}/T_{2(int,oc,sc)})$. На цьому рисунку видно, що розраховане значення Δ_{2int} у широкому діапазоні частот (18÷76 МГц) не опускається нижче 8 дБ, досягаючи максимуму $\Delta_{2intmax} = 10$ дБ на частоті 60 МГц.

На рис. 2.6 показана частотна залежність $SND = 10\lg(T_{ext}/T_{int})$ елемента АФАР ГУРТ, де добре видно, що від частоти 12,8 МГц та до верхньої межі діапазону частот, температура зовнішнього шуму T_{2ext} елемента АФАР перевищує його власну температуру T_{int} ($SND > 0$ дБ), досягаючи максимуму $SND \approx 11$ дБ на частоті 60 МГц. На цьому ж рисунку можна визначити ефективну смугу частот елемента АФАР Δf_e , в межах якої виконується умова $SND \geq 6$ дБ [59], яка дорівнює 61 МГц.

На рис. 2.6 наведено також частотну залежність SND елемента за відсутності у ньому узгоджувального кола (штрихова лінія), яка показує, що в цьому випадку ефективну смугу частот елемента не перевищує $\Delta f_e = 46$ МГц. Таким чином, можна стверджувати, що включення між диполем і МШП узгоджувального кола дало можливість майже на третину розширити ефективну смугу частот елемента.

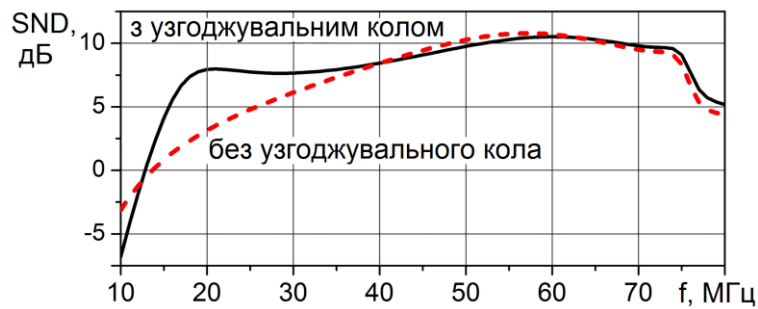


Рис. 2.6. Частотна залежність SND для антенного елемента ГУРТ.

Частотні залежності $SEFD$ та $SEFD_{sky}$ (у кЯн), які характеризують реальну та граничну чутливість активної антени, що розраховані за формулами (2.68) та (2.69), показано на рис. 2.7 суцільною та штриховою лініями, відповідно.

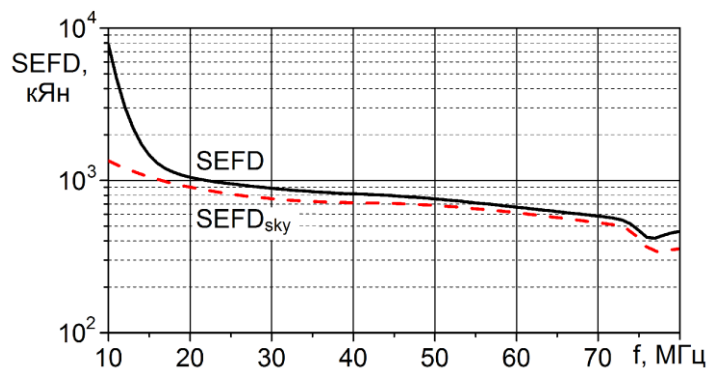


Рис. 2.7. Частотна залежність $SEFD$ антенного елемента ГУРТ.

З рисунку можна зробити висновок, що у більшій частині діапазону частот (16...77 МГц) власні шуми активної антени незначно знижують її чутливість у порівнянні з граничною, оскільки різниця між $SEFD$ та $SEFD_{sky}$ невелика (менше 1 дБ). І тільки поблизу нижньої робочої частоти різниця між ними стає достатньо відчутною (до 7.6 дБ на 10 МГц), що обумовлено появою тут помітної розузгодженості підсилювача з диполем, що не скомпенсоване узгоджувальним пристроєм.

2.6 Числовий аналіз шумової температури субрешітки АФАР ГУРТ

Використаємо викладену у підрозділі 2.4 методику для числових досліджень внутрішньої та зовнішньої температури шуму субрешітки АФАР ГУРТ. Відомо [24], [93], що у субрешітці АФАР ГУРТ суміщені дві однакові 25-елементні АФАР, кожна з яких приймає та автономно обробляє сигнал, що переноситься електромагнітною хвилею однією з двох взаємно ортогональних лінійних поляризацій. Оскільки ці АФАР ідентичні по структурі та мають ідентичні автономні ДС, їх параметри будуть однаковими, що дає право аналізувати тільки одну з них, переносячи потім отримані результати на іншу. Саме так зроблено у роботі [93], де досліджувалися енергетичні параметри субрешітки АФАР ГУРТ. Тому всі результати досліджень внутрішньої $T_{\gamma int}$ та зовнішньої $T_{\gamma ext}$ шумових температур, що представлені нижче, також будуть відноситися до субрешітки АФАР ГУРТ, що приймає хвилі однієї лінійної поляризації.

Для коректних обчислень є важливою підготовка даних про взаємні зв'язки між елементами субрешітки [94]. Для їх досліджень було розроблено програму та методику обчислень, які наведені у роботах [91], [95]. Обчислення проводилися у діапазоні частот 8-80 МГц для всіх напрямків фазування променя, що схематично показані на рис. 1.21 точками $M_{p,q}$ на UV -площині. Індекси p та q змінюються у межах $[-8, 8]$ та визначають дискретні положення променя уздовж осей U та V відповідно.

На рис. 2.8 показані частотні залежності ефективної температури внутрішнього шуму субрешітки T_{eint} (2.63) для нормального променя ($p = 0, q = 0$) та трьох відхилених променів у площинах E (5,5), H (-5,5) та X (0,7), а також її одиночного елемента.

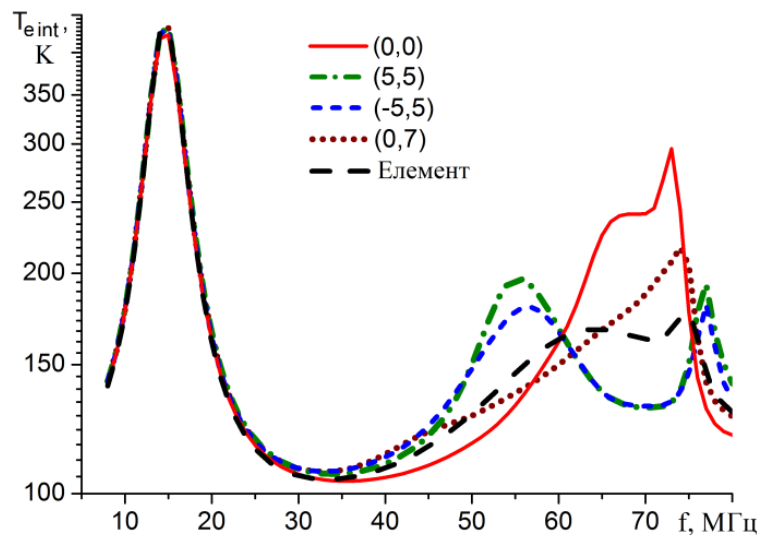


Рис. 2.8. Частотна залежність еквівалентної внутрішньої температури субрешітки АФАР ГУРТ для декількох напрямків променя.

На цьому рисунку видно, що у нижній половині діапазону частот АФАР всі наведені криві $T_{eint}(f)$ неможливо відрізнити, тобто внутрішня шумова температура субрешітки АФАР практично не залежить від напрямку променя та співпадає з такою для одиночного елемента. Однак після 30 – 40 МГц криві $T_{eint}(f)$ починають розходитися, і далі поведінка кожної з них має індивідуальний характер, який визначається фазовим розподілом на клемах взаємно пов'язаних диполів.

Частотні залежності еквівалентної зовнішньої шумової температури субрешітки $T_{ext}(f)$ для тих самих напрямків променя, що розраховані за формулами (2.61) і (2.63), наведені на рис. 2.9,

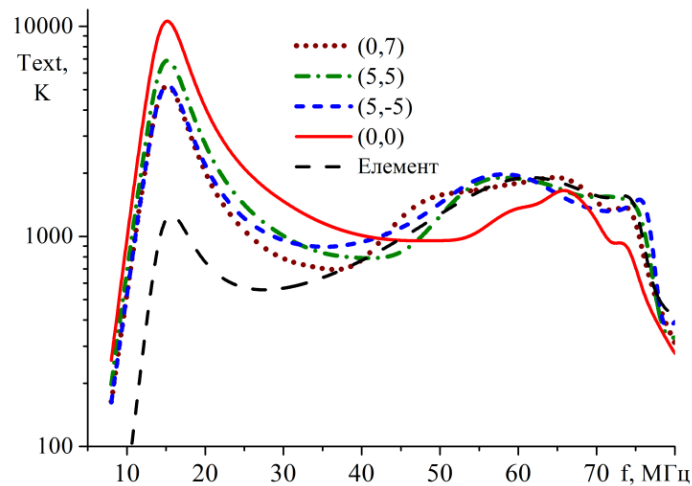


Рис. 2.9. Частотна залежність еквівалентної зовнішньої температури субрешітки АФАР ГУРТ для декількох напрямків променя.

На рис. 2.9 видно, що у нижній половині діапазону частот ($f < 40$ МГц) зовнішня шумова температура нормального променя превалює над температурою відхилених променів і значно перевищує шумову температуру елемента. Але з наближенням до 40 МГц усі шумові температури, що наведені на рисунку, майже зрівнюються і далі йдуть одним пучком, за виключенням температури нормального променя. Така поведінка $T_{ext}(f)$ є результатом впливу взаємодії елементів у субрешітці, бо якщо ними знехтувати, всі криві на графіку зіллються в одну й будуть співпадати з $T_{ext}(f)$ одного елемента.

На рис. 2.10 наведено чотири сімейства графіків частотних залежностей SND субрешітки АФАР ГУРТ, розрахованих для різних напрямків її променя.

На першому з них (рис. 2.10 а) наведено сімейство кривих $SND(f)$ субрешітки для всіх 213 можливих напрямків її променя у верхній півсфері (рис. 1.21), а інші три – більш докладно демонструють поведінку $SND(f)$ субрешітки з різними напрямками променя у площинах E (рис. 2.10, б), H (рис. 2.10, в) та X (рис. 2.10, г).

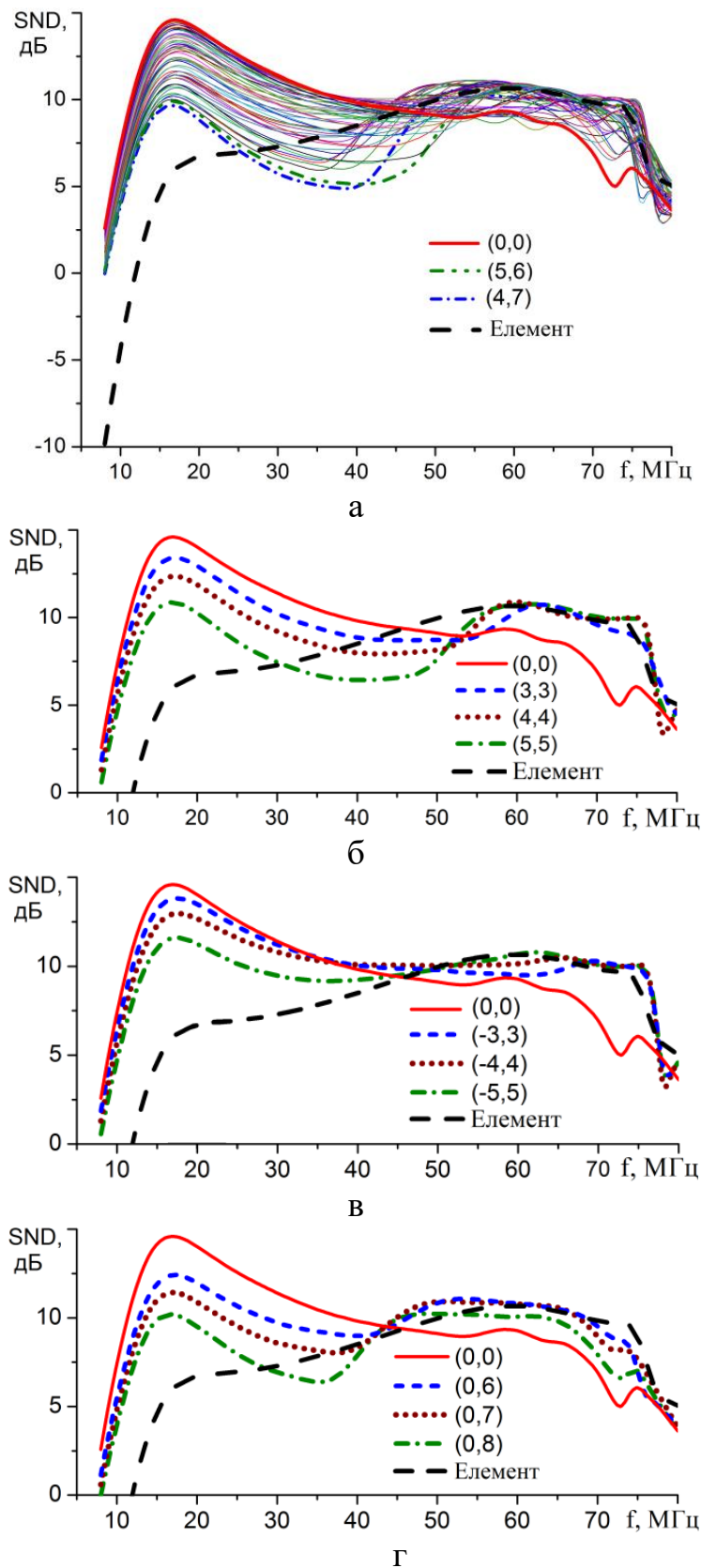


Рис. 2.10. Сімейство частотних залежностей SND АФАР ГУРТ для різних напрямків її променя при скануванні у всій верхній півсфері (а), а також у площинах E (б), H (в) та X (г).

На рис. 2.10, а всі криві згруповані у пучок, ширина якого змінюється від 3 дБ поблизу нижньої межі даного діапазону частот до 5 дБ у центрі. У нижній половині діапазону цей пучок структурований таким чином, що крива, яка належить до нормального променя, огинає його зверху, а криві, котрі належать до найбільш відхилених променів (5,6), (4,7), замикають його знизу. У верхній частині частотного діапазону дана картина змінюється, сам пучок помітно стискається, а крива, що належить до нормального променя, опускається вниз. Варто зазначити, що локальний підйом внутрішньої шумової температури $T_{e\,int}(f)$ у районі 15 МГц, чітко помітний на рис. 2.8, обумовлений наявністю узгоджувального кола на вході МШП [79], [93]. Ще у більшій мірі це коло підвищує рівень прийнятого сигналу (і, відповідно, зовнішнього шуму) на частотах нижче 15 МГц, тому у області піку $T_{e\,int}(f)$ значення SND субрешітки, як це впливає з рис. 2.10, не тільки не зменшується, але навіть збільшується.

Розкид кривих $SND(f)$ субрешітки для різних напрямків променя, як і розкид шумових температур $T_{e\,ext}(f)$ і $T_{e\,int}(f)$, пояснюється впливом міжелементних зв'язків, тому що у припущенні їх відсутності ця залежність зникає та $SND(f)$ субрешітки для всіх променів буде однаковим, таким, як у одного елемента субрешітки (рис. 2.10 а). Це неважко показати, якщо у відповідних розрахункових формулах прирівняти до нуля усі недіагональні елементи матриці власних та взаємних опорів \mathbf{Z} , що характеризують взаємодію елементів у субрешітці.

Звертає на себе увагу той факт, що на частотах 8–15 МГц наявність взаємних зв'язків у субрешітці дає можливість підвищити її SND на 5–12 дБ (в залежності від номеру променя), що дуже важливо для підвищення її чутливості на цій ділянці діапазону, оскільки без них її SND тут був би нижчим, таким як і в елемента. Зі зростанням частоти SND елемента збільшується і в районі 40-50 МГц його крива на графіку проходить крізь пучок кривих $SND(f)$ субрешітки. На рис. 2.10 г добре видно, як всі криві

поблизу 44 МГц сходяться до однієї точки, де значення SND елемента та субрешітки для всіх напрямків променя практично співпадають. Після 60 МГц SND субрешітки виявляється нижче, ніж у елемента, але це не викликає побоювань, тому що абсолютне його значення тут достатньо велике. Смуга частот, у якій SND субрешітки не опускається нижче 6 дБ, в середньому складає 65 МГц серед усіх променів. Виключенням з них є промені (5,6) і (4,7) та симетричні їм, що відхилені від нормалі більш ніж на 70 градусів. Вони показані рис. 2.10 а переривчастими лініями. Ця смуга для субрешітки приблизно на 8 МГц ширше, ніж аналогічна смуга частот для її елемента.

На рис. 2.11 показані частотні залежності SEFD субрешітки у порівнянні з цим же параметром для її елемента, що дають можливість оцінити їх чутливості у діапазоні частот, що розглядається. Зменшення SEFD субрешітки на 7-17 дБ відносно SEFD елемента, що тут спостерігається, викликана головним чином різницею їх ефективних площ. Найвища чутливість субрешітки, що відповідає мінімуму SEFD на частоті 68 МГц, складає приблизно 39 кЯн, що є непоганим показником для решітки таких розмірів.

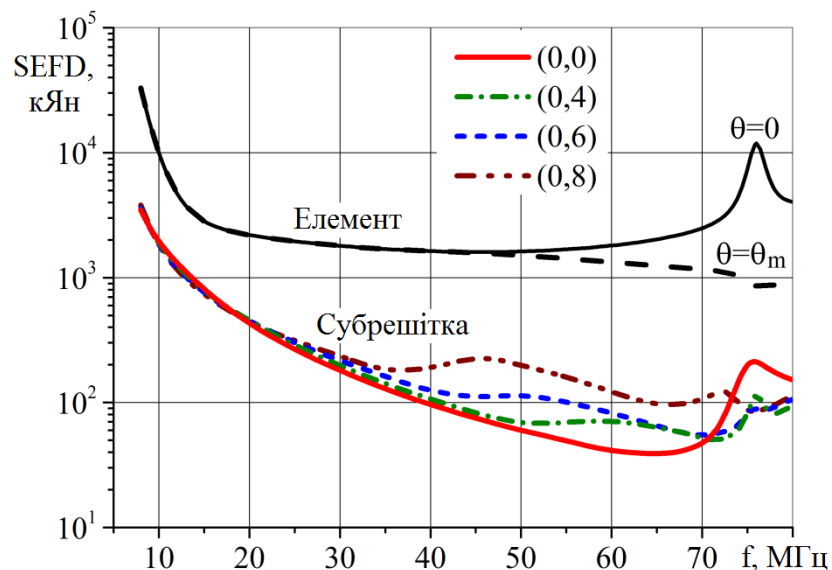


Рис. 2.11. Частотні залежності параметру SEFD для субрешітки ГУРТ та її елемента.

2.7 Зіставлення результатів розрахунку та експерименту для елемента АФАР ГУРТ

Для перевірки коректності виконаних розрахунків були проведені експериментальні дослідження шумової температури елемента АФАР ГУРТ. На рис. 2.12 показана функціональна схема повного високочастотного тракту, що складається з елемента АФАР ГУРТ, фідера та приймача ADR (Advanced digital receiver) [28], [29], що поєднаний з комп'ютером. Диполь та МШП, що стоять до перерізу 2, належать до елемента АФАР, а всі пристрої, що включені в тракт між перерізами 2 та 3 (кабелі, фазообертачі, підсилювачі, фільтри та ін.) – до фідера [96].

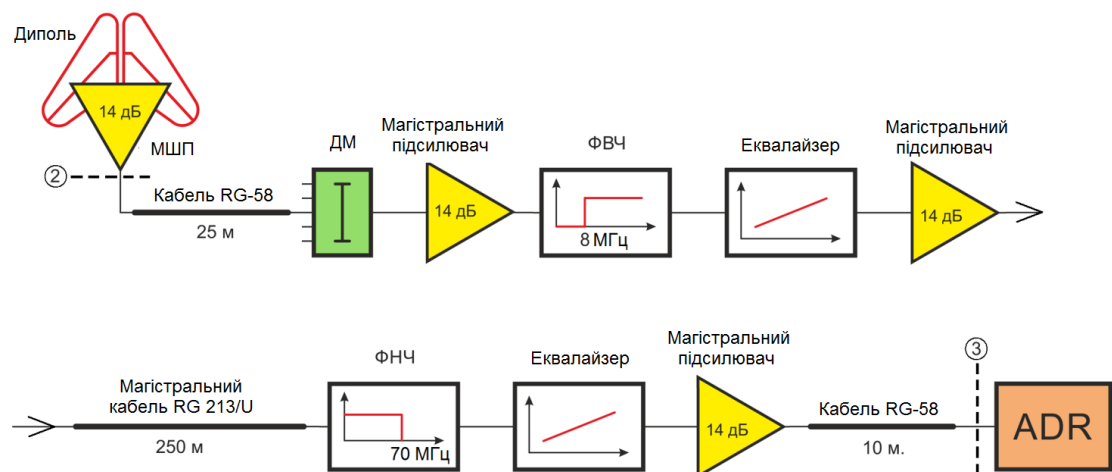


Рис. 2.12. Функціональна схема високочастотного тракту схеми вимірювань шумових характеристик активної антени ГУРТ.

Для проведення експериментів було взято один з елементів субрешітки АФАР ГУРТ, а інші її елементи були від'єднані від фідерної схеми. У штатному режимі роботи приймач фіксував шумову температуру $T_{3sys} = T_{3ext} + T_{3int}$ де $T_{3ext} = T_{2ext} K_F$ та $T_{3int} = T_{2int} K_F + T_F + T_{ADR}$ K_F – коефіцієнт передачі фідера по потужності, T_F та T_{ADR} – температури шуму фідера та приймача відповідно, що приведені до перерізу 3.

Виділити T_{3int} чи T_{3ext} окремо з результатів вимірювань T_{3sys} практично неможливо, оскільки для цього було б необхідно “вимкнути” чи джерела власних шумів елементу АФАР, чи джерела зовнішнього шуму. Перший спосіб відпадає за зрозумілими причинами. Виключити зовнішні шуми з процесу вимірювань в принципі можливо, однак також практично нереально, оскільки для цього було б необхідно помістити диполь у своєрідну безлунну камеру доволі великих розмірів (враховуючи найбільшу у робочому діапазоні довжину хвилі у 30 м), яка повинна була б ізолювати диполь від зовнішнього випромінювання, не спотворюючи вплив ґрунту на його параметри. Ще один можливий спосіб усунення зовнішніх шумів зі схеми вимірювань полягає у заміні диполя його еквівалентом – деяким пасивним двополюсником, імпеданс якого співпадає з імпедансом диполя. Однак цей варіант також не раціональний, як через труднощі реалізації такого еквівалента у широкому діапазоні частот, так і через те, що така заміна викривляє структуру власних шумів активної антени. Дійсно, у цьому випадку не тільки виключаються зі схеми вимірювань важливі джерела шумів, що знаходяться у самому диполі і у близько розташованій до нього землі, але ще й додаються сторонні джерела шуму, що містяться у еквіваленті. Тому доцільніше оцінювати власні шуми елемента АФАР ГУРТ у режимах холостого ходу та короткого замкнення входів МШП, які легко реалізуються та повністю виключають появу у високочастотному тракті як зовнішнього шуму, так і будь-яких сторонніх шумів. Відповідні температури шуму легко піддаються і вимірюванням, і розрахункам, що дає можливість порівнювати їх між собою.

На рис. 2.13 а наведені частотні залежності температур, що й на рис. 2.5 а, але віднесених до входу приймача (до перерізу 3). Порівнюючи ці рисунки, неважко прослідкувати, як трансформуються частотні характеристики складових температури шуму елемента АФАР ГУРТ з перенесенням їх з перерізу 2 до перерізу 3 (рис. 2.13).

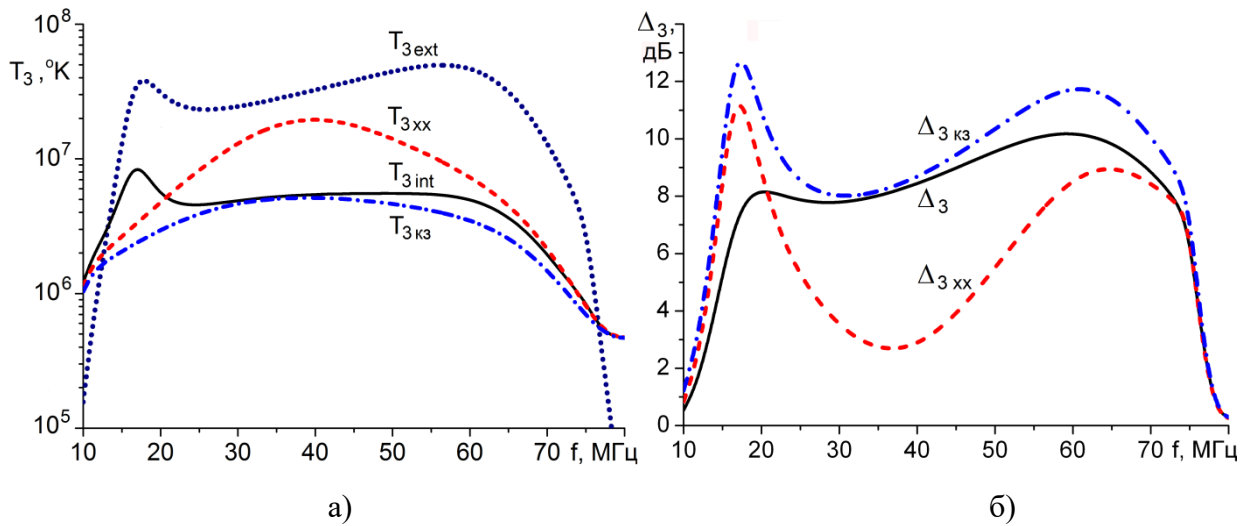


Рис. 2.13. Частотні залежності шумових температур T_{3ext} , T_{3int} , T_{3xx} та $T_{3кз}$ (а) на вході приймача і відповідних перевищень Δ_3 , Δ_{3xx} та $\Delta_{3кз}$ (б).

На рис. 2.13 б показані частотні залежності перевищень Δ_3 системної шумової температури T_{3sys} над температурами шуму T_{3int} , T_{3xx} та $T_{3кз}$ на вході приймача. Нескладно побачити, що до частоти 70 МГц вони повторюють поведінку аналогічних залежностей $\Delta_2(f)$ на рис. 2.5 б, побудованих для перерізу 2. Так, наприклад, відмінність між Δ_2 та Δ_3 у переважній частині діапазону, від 10 до 60 МГц, не перевищує 0,5 дБ, і тільки біля частоти 70 МГц зростає до 1 дБ. Однак після частоти 70 МГц, що співпадає з частотою зрізу фільтра нижніх частот, включеного у фідер (рис. 2.13), всі Δ_3 за зрозумілими причинами починають стрімко падати, прямуючи до нуля.

На рис. 2.14 показані результати розрахунку та результати вимірювань нормованих шумових температур \tilde{T}_{3sys} , \tilde{T}_{3xx} та $\tilde{T}_{3кз}$ на вході приймача [96]. Нормування цих температур виконувалося за правилом:

$$\tilde{T}_{3(sys,xx,kz)} = 10 \lg(T_{3(sys,xx,kz)} / T_{ADR}) + \mu \quad (2.72)$$

де T_{ADR} – температура власного шуму приймача ADR, $\mu = -127$ дБ – “нульовий” рівень, що виставляється при калібруванні приймача, коли на

його вхід нічого не подається ззовні, іншими словами, μ – це рівень відгуку приймача на власний шум T_{ADR} .

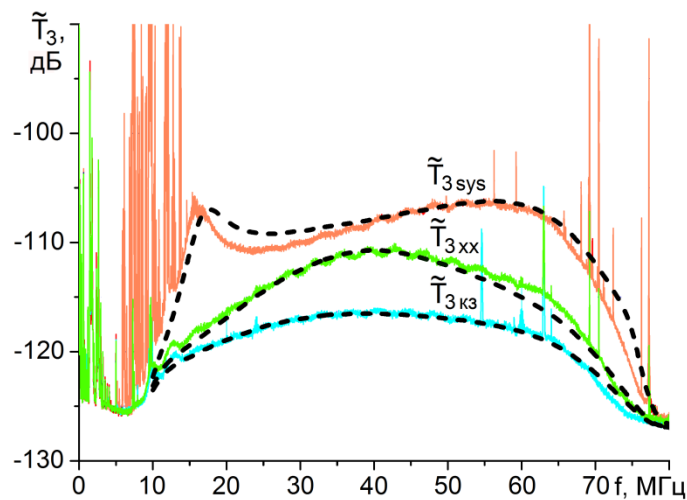


Рис. 2.14. Нормовані температури шуму \tilde{T}_{3sys} , \tilde{T}_{3xx} та \tilde{T}_{3kz} на вході приймача: суцільні лінії – експеримент, штрихові лінії – розрахунок.

Графіки, що наведені на рис. 2.14, свідчать про хороший збіг результатів розрахунку нормованих шумових температур \tilde{T}_{3sys} , \tilde{T}_{3xx} та \tilde{T}_{3kz} з результатами вимірювань, що дає право бути впевненими у коректності запропонованої методики оцінки чутливості активних антен і у високій точності результатів, що отримуються за її допомогою [96].

2.8 Зіставлення результатів розрахунку та експерименту для АФАР ГУРТ

Вимірювання шумової температури субрешітки АФАР ГУРТ проводилися 21 травня 2015 року на території Радіоастрономічної обсерваторії ім. акад. С. Я. Брауде. Досліджувалась одна з субрешіток АФАР, що працює у режимі приймання електромагнітних хвиль лінійної

поляризації. На рис. 2.15 наведена блок-схема вимірювальної установки, що складається з досліджуваної субрешітки, віддаленого цифрового приймача ADR [28], [29] та фідера.

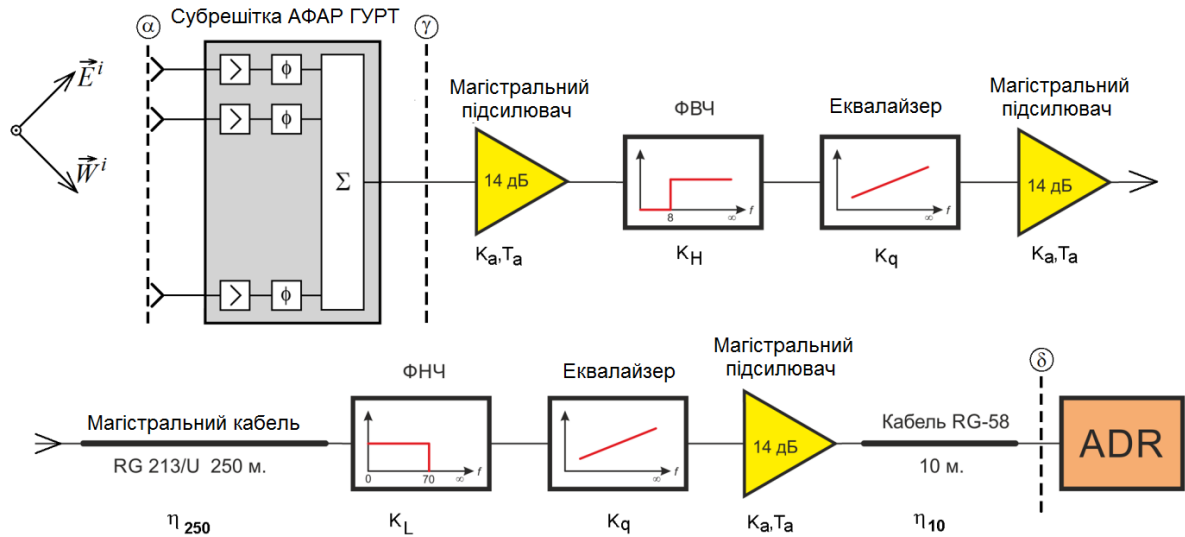


Рис. 2.15. Блок-схема вимірювальної установки шумових параметрів субрешітки ГУРТ.

Фідер, що з'єднує вихід субрешітки (переріз γ) з входом ADR (переріз δ), виконує не тільки свою основну функцію – каналізацію прийнятого сигналу до віддаленого приймача, але і функцію корекції передаточної характеристики субрешітки для придушення позасмугових завад, що дає можливість максимізувати чутливість й лінійність цифрового приймача у всьому робочому діапазоні частот [24]. Тому у склад фідера окрім відрізків коаксіального кабеля входять також магістральні розподілені підсилювачі, частотноселективні пристрої (фільтри) та частотнозалежні атенюатори (еквалайзери). Частотна характеристика нормованого коефіцієнта передачі фідеру K_F показана на рис. 2.16.

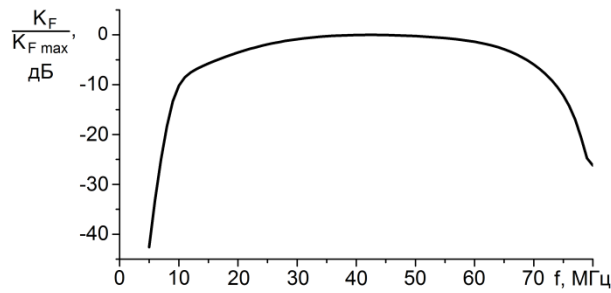


Рис. 2.16. Нормований коефіцієнт передачі фідера.

Дана вимірювальна установка пройшла випробування під час досліджень шумової температури елемента АФАР ГУРТ [93] та показала високий ступінь придатності для отримання достовірних результатів вимірювань.

Нагадаємо, що мета експериментальних досліджень полягала не у вимірюванні абсолютних шумових температур субрешітки, а у визначенні співвідношення між зовнішньою та внутрішньою температурами шуму на вході приймача. У зв'язку з цим вимірювання проводилися у два етапи, на першому оцінювалася внутрішня шумова температура T_{int} субрешітки, а на другому – зовнішня T_{ext} . Коли субрешітка працює у штатному режимі, на вхід приймача потрапляє суміш внутрішніх та зовнішніх шумів, що характеризується системною шумовою температурою $T_{sys} = T_{int} + T_{ext}$, з якої, як ми наголошували, відокремити кожен складову з результатів вимірювань практично неможливо. Тому на першому етапі замість T_{int} вимірювалася температура шуму $T_{кз}$ субрешітки, у якої входні клемі ДС були від'єднанні від клем диполів та замкнені накоротко. За результатами досліджень елемента АФАР ГУРТ [93] було виявлено, що дійсна температура його внутрішніх шумів T_{int} близька до шумової температури в режимі короткого замкнення $T_{кз}$ і знаходиться в інтервалі між $T_{кз}$ та T_{xx} . Варто відзначити, що розрахункові значення $T_{кз}$ субрешітки та її елемента співпадають, що неважко показати, замінюючи матрицю імпедансів решітки диполів z матрицею імпедансів короткозамикачів $z_{sc} = -E$. На шумову температуру $T_{кз}$

не впливає ані стан фазообертачів, що задають напрямок променя, ані взаємодія диполів (оскільки вони відключені), тому її можна використовувати як опорну при порівнянні результатів вимірювань.

На другому етапі вимірювалася системна шумова температура субрешітки T_{sys} , яка спільно з вже знайденою $T_{int} \approx T_{кз}$ дає можливість оцінити температуру зовнішнього шуму T_{ext} та параметр SND. Вимірювання T_{sys} виконувалися у діапазоні частот 8–80 МГц для всіх напрямків фазування променя субрешітки у площинах H , X та Y (рис. 1.21), у тому числі й напрямків, що виходять за межі області видимості. Результати вимірювань шумових температур $T_{sys,кз}$ субрешітки АФАР ГУРТ на вході приймача представлені на рис. 2.17 (суцільні криві) у нормованому вигляді. Для цих же положень променя були розраховані системні шумові температури T_{sys} субрешітки, а також шумова температура короткого замкнення $T_{кз}$, які потім були проноврені за допомогою наступного співвідношення

$$\tilde{T}_{sys,кз} = 10 \log \left(\frac{T_{sys,кз} + T_{ADR}}{T_{norm}} \right) = 10 \log \left(\frac{T_{sys,кз}}{T_{ADR}} + 1 \right) + \tilde{T}_{ADR}, \quad (2.73)$$

де $T_{ADR} = \tilde{T}_{ADR} / T_{norm}$; T_{ADR} та T_{norm} – температура шуму приймача ADR та температура нормування відповідно.

Величини T_{ADR} та T_{norm} обиралися таким чином, щоб нормовані розрахункові значення температури короткого замкнення $\tilde{T}_{кз}$ субрешітки співпадали з її експериментальними значеннями у двох точках – на частоті 80 МГц, де крива $\tilde{T}_{sc}(f)$ опускається до мінімуму, і у середині діапазону на частоті 40 МГц. Результат суміщення цих кривих показано на рис. 2.17 а, де нижня суцільна лінія і пунктирна лінія представляють експериментальну та розрахункову залежності $\tilde{T}_{sc}(f)$, відповідно. Інші криві на всіх графіках, що наведені на рис. 2.17, демонструють експериментальні (суцільні лінії) та розрахункові (переривчасті лінії) частотні залежності нормованих системних

шумових температур $\tilde{T}_{sys}(f)$ на виході субрешітки, коли її промінь направлений у зеніт (рис. 2.17 а), а також коли він займає фіксовані положення при відхиленні від зеніту у площинах H (рис. 2.17 б, в, г) та X , Y (рис. 2.17 д, е, ж, з). Розрахункові залежності $\tilde{T}_{sys}(f)$ на кожному з цих рисунків представлені двома кривими, що відрізняються значеннями яскравісної температури фону T_{sky} . Для розрахунку верхньої з них (штрихова лінія) величина T_{sky} обчислювалася за формулою (2.55), а для нижньої (штрих-пунктирна лінія) вона бралася вдвічі меншою з метою показати, як змінюються залежності $\tilde{T}_{sys}(f)$ при добових варіаціях T_{sky} , розмах яких, як показано у [87], складає приблизно 3 дБ, якщо приймання фонового випромінювання здійснюється слабонаправленою антеною. Нормування усіх розрахункових кривих $T_{sys}(f)$ виконувалося за формулою (2.73) із використанням знайдених раніше значень T_{ADR} та T_{norm} .

На рис. 2.17 а поряд зі згаданими вище графіками залежності $\tilde{T}_{sc}(f)$ є ще дві суцільні криві, що показують виміряні частотні залежності системної шумової температури $\tilde{T}_{sys}^{(1)}(f)$ та $\tilde{T}_{sys}^{(2)}(f)$ субрешітки, промінь якої направлений у зеніт. Відмінність $\tilde{T}_{sys}^{(1)}(f)$ від $\tilde{T}_{sys}^{(2)}(f)$ на рис. 2.17 а полягає в тому, що вимірювання їх виконувалися з різницею у півдобі, до того ж одна з них $\tilde{T}_{sys}^{(1)}(f)$ вимірювалась тоді, коли яскравісна температура T_{sky} галактичного фону була близькою до максимальної, а інша, $\tilde{T}_{sys}^{(2)}(f)$, коли T_{sky} була близька до мінімальної.

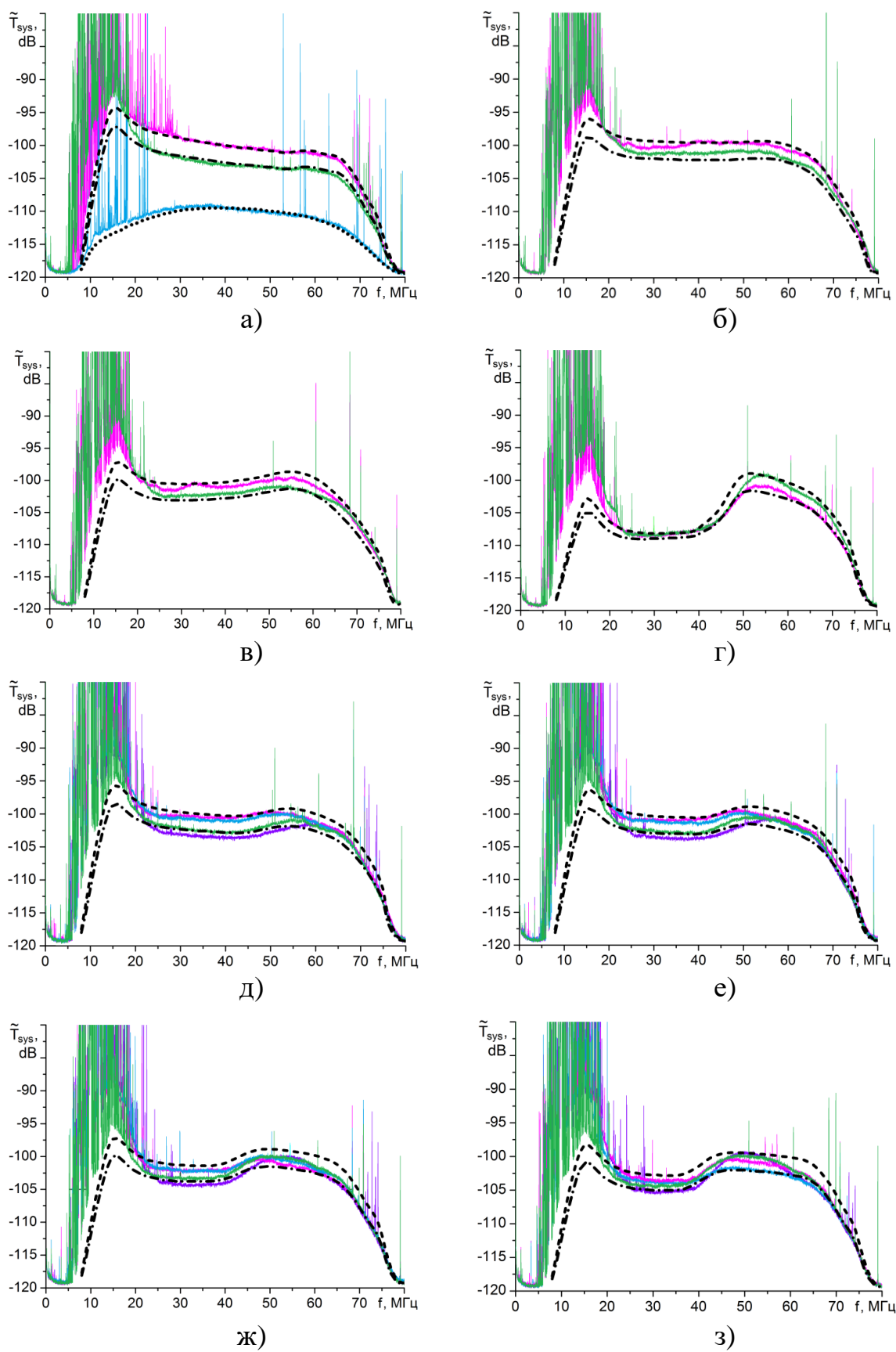


Рис. 2.17. Нормована температура шуму субрешітки АФАР ГУРТ на вході приймача для різних напрямків її променя:

а) (0,0); б) (-4,4); в) (-5,5); г) (-8,8); д) (0,5); е) (0,6); ж) (0,7); з) (0,8)

Як видно з рис. 2.17, розрахункові та вимірні значення нормованих шумових температур субрешітки, промінь якої орієнтовний у зеніт, дуже добре співпадають у більшій частині робочого діапазону частот радіотелескопа. Помітні відмінності між ними спостерігаються лише на частотах $f < 20$ МГц, де мають місце сторонні завади, прийнята потужність від яких створює добавку до галактичного фону. Ці завади настільки інтенсивні, що проникають навіть крізь входи ДС, що перебувають в режимі короткого замкнення, та, додаючись до власного шуму субрешітки, частково завищують показники приймача $\tilde{T}_{sc}(f)$ на нижніх частотах.

На рис. 2.17 також показані розрахункові та експериментальні частотні залежності нормованих системних шумових температур $\tilde{T}_{sys}(f)$ на виході субрешітки для різних напрямків її променя у площині H (рис. 2.17 б, в, г) та головних площинах X , Y (рис. 2.17 д, е, ж, з). У виборі графіків для ілюстрації віддавалася перевага віддаленим від нормалі променям, оскільки частотні залежності шумових температур субрешітки з близькими до нормалі променями мало відрізняються від таких для центрального променя. На кожному зі згаданих рисунків містяться дві чи чотири експериментальні криві (суцільні лінії), що відповідають променям у симетричних напрямках, для яких розрахункові залежності ідентичні. У площині H (так само, як і у площині E) субрешітка має лише по два симетричних променя, тому на рис. 2.17 б показані дві криві $\tilde{T}_{sys}(f)$, що відповідають променям $(-4,4)$ та $(4,-4)$, на рис. 2.17 в – променям $(-5,5)$ та $(5,-5)$, на рис. 2.17 г – променям $(-8,8)$ та $(8,-8)$. Всі інші промені субрешітки мають подвійну симетрію відносно площин E та H , тому на рис. 2.17 д, е, ж, з показані по чотири експериментальні криві, що відповідають симетричним променям, що відхилені у площинах X та Y . Зокрема на рис. 2.17 д показані дві криві $\tilde{T}_{sys}(f)$ для променів $(0,5)$, $(0,-5)$, $(5,0)$ та $(-5,0)$, на рис. 2.17 е – для променів $(0,6)$,

(0,-6), (6,0) та (-6,0), на рис. 2.17 ж – для променів (0,7), (0,-7), (7,0) та (-7,0), на рис. 2.17 з – для променів (0,8), (0,-8), (8,0) та (-8,0).

На графіках видно деякі відмінності експериментальних кривих від розрахункових, які можна пояснити, передусім, відмінністю ізотропної моделі фонового випромінювання, що прийнята у розрахунках, від реального розподілення яскравісної температури галактичного фону на небесній сфері. Насправді фонове випромінювання Галактики неоднорідне, у її полярних областях воно більш слабке, ніж у ізотропній моделі, а у напрямку диску сильніше. Тому при перемиканні променя реальна зовнішня температура шуму може помітно змінюватися у залежності від того, у яку область небесної сфери спрямовано промінь. Цим же пояснюється відмінність у експериментальних залежностях $\tilde{T}_{sys}(f)$ субрешітки для симетричних двох променів, які у разі ізотропного фонового випромінювання повинні співпадати.

Окремо варто прокоментувати графік (рис. 2.17 г), який побудовано для субрешітки, що формує промені (8,8) та (-8,-8), напрямки фазування яких виходять далеко за область видимості (рис. 1.21). У цих випадках вона приймає фонове випромінювання переважно боковими пелюстками, конфігурація яких швидко змінюється з частотою. Хоча такий режим роботи на практиці не застосовується, він цікавий з точки зору порівняння результатів розрахунків та вимірювань.

Досліджуючи наведені графіки, нескладно встановити, що всі розрахункові залежності $\tilde{T}_{sys}(f)$ дуже добре повторюють форму експериментальних кривих, при цьому їх значення мало відрізняються від виміряних у переважній частині досліджуваного діапазону частот, а помітні відмінності між ними у нижній частині діапазону, скоріш за все, пов'язані з впливом інтенсивних завад на результати вимірювань. Це переконливо вказує на коректність розробленої теорії та високу якість проведених вимірювань.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Запропонована і розроблена математична модель активної приймальної антени, що використовується як елемент АФАР радіотелескопа ГУРТ, яка дає можливість коректно розраховувати її енергетичні та шумові характеристики у широкому діапазоні частот. Модель базується на матричній теорії антенних решіток, теорії шумних багатополіусників та методі моментів, що застосовується у теорії дротяних антен та розсіювачів. Викладена методика розрахунку чутливості активної антени, базується на комп'ютерному моделюванні окремих її вузлів та антени в цілому.

Проведено дослідження чутливості активної антени та субрешітки АФАР, що використовується у якості складового елемента радіотелескопа ГУРТ нового покоління, наведені результати чисельних розрахунків, які порівнюються з результатами експериментальних вимірювань.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження шумових параметрів субрешітки АФАР ГУРТ. Теоретичні дослідження виконувалися методом комп'ютерного моделювання з використанням розробленої математичної моделі субрешітки, що доповнена співвідношеннями, які описують її шумові властивості. На базі цієї моделі розроблена методика розрахунку внутрішньої та зовнішньої шумових температур субрешітки, що необхідні для оцінки її чутливості. За допомогою цієї методики був виконаний чисельний аналіз частотних залежностей внутрішньої та зовнішньої шумових температур субрешітки АФАР ГУРТ у діапазоні 8-80 МГц для всіх можливих положень її променя. У результаті аналізу встановлено, що температура зовнішнього шуму на її виході значно перевищує температуру внутрішнього шуму у всьому робочому діапазоні частот, а ширина смуги частот, в якій величина цього перевищення не опускається нижче 6 дБ, складає приблизно 65 МГц для всіх променів у конусі сканування 140 градусів.

Для перевірки результатів чисельних розрахунків проведені натурні вимірювання температур внутрішніх та зовнішніх шумів субрешітки для різноманітних положень її променя у досліджуваному діапазоні частот, які повністю підтвердили результати чисельних досліджень і переконливо довели, що дана субрешітка може бути ефективно використана для радіоастрономічних спостережень як у складі великої АФАР ГУРТ, так і у якості самостійної антенної системи радіотелескопа ГУРТ.

Основні положення та результати цього розділу викладені в публікаціях автора [25]–[27], [30], [82]–[86], [89]–[91], [93]–[101].

РОЗДІЛ 3

РАДІОАСТРОНОМІЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОРОЗМІРНИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ

Цілком природно, що на початку радіоастрономічних досліджень антени НЧ радіотелескопів мали невеликі розміри. Зокрема засновник радіоастрономії Карл Янський зафіксував фонове радіовипромінювання Галактики, використовуючи невелику антену, що працювала на частоті 20.5 МГц. Згодом радіоастрономічні дослідження вимагали все більших антен, чутливість і роздільну здатність яких підвищували шляхом збільшення їх розмірів. Зауважимо також, що на початкових етапах розвитку радіоастрономії здебільшого вивчали джерела континуального випромінювання, час накопичення сигналу від яких обмежується лише термінами їх спостереження на видимій частині небесної сфери та можливостями накопичення сигналу приймачами. Радіоджерела з швидкозмінним випромінюванням можна було спостерігати лише тоді, коли потоки енергії від них були досить великими. До того ж спостереження проводилися у доволі вузьких смугах частот, що заважало коректно дослідити швидкозмінні процеси.

Об'єктами досліджень сучасної радіоастрономії є перш за все космічні джерела, що випромінюють швидкозмінні сигнали. Реєстрація та аналіз таких сигналів стали можливими тільки з розвитком цифрових технологій прийому, реєстрації і обробки сигналів. Сучасна апаратура радіоастрономічних спостережень дає можливість застосовувати ефективні способи збільшення чутливості радіотелескопів, як то накопичення сигналу у частотній області, зменшення шуму приймальної системи, тощо. Новітні технічні засоби відкривають нові можливості для використання невеликих антен для радіоастрономічних спостережень, повніше розкриваючи їх потенціал та економлячи час спостережень на великих радіотелескопах.

3.1 Флуктуаційна чутливість як основна оцінка можливостей спостережень малорозмірних НЧ радіотелескопів

Важливим фактором, що обмежує можливості спостереження та розрізнення радіоастрономічних джерел є ефект плутанини (англ. – confusion effect). Вплив цього ефекту визначається кутовою відстанню між радіоджерелами континууму, потоки випромінювання від яких є більшими або граничними для виявлення певним радіотелескопом за умови, що ширина ДН його антени дає можливість розрізнити такі джерела. Тобто, розрізнення відбувається як за просторовим (кутова відстань між джерелами, ширина головної пелюстки ДН антени радіотелескопа), так і за енергетичним (потоки джерел які може виявити радіотелескоп) критеріями. Малорозмірні антени НЧ радіотелескопів не мають достатньої роздільної здатності для ефективного використання просторового критерію, а за таких умов енергетичний критерій також перестає відігравати свою визначальну роль. Однак таке обмеження існує тільки для спостережень компактних джерел з безперервним широкосмуговим радіовипромінюванням, прикладами яких можуть бути радіогалактики, квазари, залишки спалахів наднових, емісійні туманності, тощо. Саме для таких джерел використовують енергетичний та просторовий критерії розрізнення і ідентифікації. І саме ці джерела складали основну популяцію об'єктів для спостереження на початкових етапах експериментальної радіоастрономії.

Однак деякі класи радіоастрономічних об'єктів та види космічного радіовипромінювання не мають такого обмеження через специфічні характеристики їхнього випромінювання.

Кількість джерел спорадичного, імпульсного та вузькосмугового радіовипромінювання доволі обмежена, і такі джерела мають унікальні особливості випромінювання у частотній та часовій області. Це дає можливість застосовувати додаткові критерії ототожнення такого

радіовипромінювання з його джерелами. Тобто до просторового та енергетичного критеріїв розрізнення та ідентифікації додаються частотний та часовий. Ці додаткові критерії найкращим чином проявляються в аналізі радіовипромінювання у спектральній області із використанням динамічних спектрів.

Сигналами, що мають такі особливості, є монохроматичні лінії випромінювання або поглинання міжзоряної речовини, імпульсні сигнали пульсарів та транзієнтів, спорадичне випромінювання Сонця, планет, міжзоряного та міжпланетного середовища, тощо. Для більшості з таких об'єктів їх радіовипромінювання було відкрито завдяки вдосконаленню приймальної радіоастрономічної апаратури та методів обробки даних. На сучасному етапі розвитку радіоастрономічної апаратури та методів обробки даних деякі, в тому числі моніторингові, дослідження таких джерел не потребують великих антенних систем.

У випадку, коли об'єкт можна однозначно ідентифікувати за виглядом його частотно-часових характеристик випромінювання, обмежуючим фактором стає тільки флуктуаційна чутливість. Тому у подальшому аналізі можливостей малорозмірних антенних решіток НЧ радіотелескопів ми можемо обмежитися лише оцінкою цієї характеристики приймальної системи радіотелескопа.

Флуктуаційна чутливість визначається за формулою (2.4) і є однією з найважливіших характеристик радіотелескопа, оскільки вона показує який мінімальний потік радіовипромінювання космічного радіоджерела може зареєструвати приймач радіотелескопа на фоні повного шуму системи, що включає як внутрішні шуми апаратури, так і зовнішні фонові шуми.

Флуктуаційна чутливість бере до уваги не тільки параметри радіотелескопа, а й параметри самих спостережень, зокрема смугу частот Δf пропускання приймача і τ – час накопичення сигналу для запису, які зазвичай підбираються в залежності від типу сигналу, який необхідно зареєструвати. Якщо для реєстрації випромінювання джерел континууму, потік яких не

змінюється за час тривалості спостережень у широкій смузі частот, параметрами τ і Δf можна варіювати у великих межах, то для спорадичних та імпульсних сигналів вибору цих параметрів треба приділяти особливу увагу. Для таких сигналів необхідно заздалегідь знати оптимальні параметри спостережень, або спостерігати їх з високими розділеннями за обома параметрами, а потім, під час подальшої обробки результатів спостережень, підбирати їх величини експериментальним шляхом. Останній підхід також дає можливість проводити більш ефективно очищення результатів спостережень від завад, але потребує значно більших ресурсів (обсягу інформаційних сховищ, обчислювальних потужностей, складніших програм обробки, людського ресурсу тощо).

Знаючи середні потоки різних джерел космічного радіовипромінювання, оптимальні час та смугу частот накопичення, можна оцінити можливості спостережень різних джерел задавшись необхідним відношенням С/Ш для впевненої ідентифікації сигналу. Результати такої оцінки для субрешітки ГУРТ та потрібні параметри накопичення сигналу відповідних джерел для його надійної реєстрації з відношенням С/Ш = 10 показано на рис. 3.1. Смуги частот у 0.006, 0.6 та 60 МГц показані нахиленими штриховими лініями. Для побудови цієї діаграми були обрані наступні параметри: середні потоки випромінювання джерел 3C461 (Кассіопея А) та 3C75 на частоті 40 МГц були взяті 110 000 та 27 000 Ян в результаті апроксимації даних [102], [103]. Для S-сплесків Юпітера прийняте значення у 10^6 Ян, для сонячного радіовипромінювання прийняте значення у одну сонячну одиницю потоку (1 с.о.п. = 10^4 Ян), реальні потоки спорадичного випромінювання цих джерел можуть бути на 1-2 порядки більшими [104]–[106]. Щодо спостереження пульсарів очевидний є факт, що субрешітка ГУРТ не зможе ідентифікувати їх одиночні імпульси, оскільки вони мають коротку тривалість. Однак імпульси пульсарів, що мають точно визначену періодичність можна накопичувати у часі, отримуючи усереднені імпульси. Для найпотужніших пульсарів час такого накопичення може складати декілька годин.

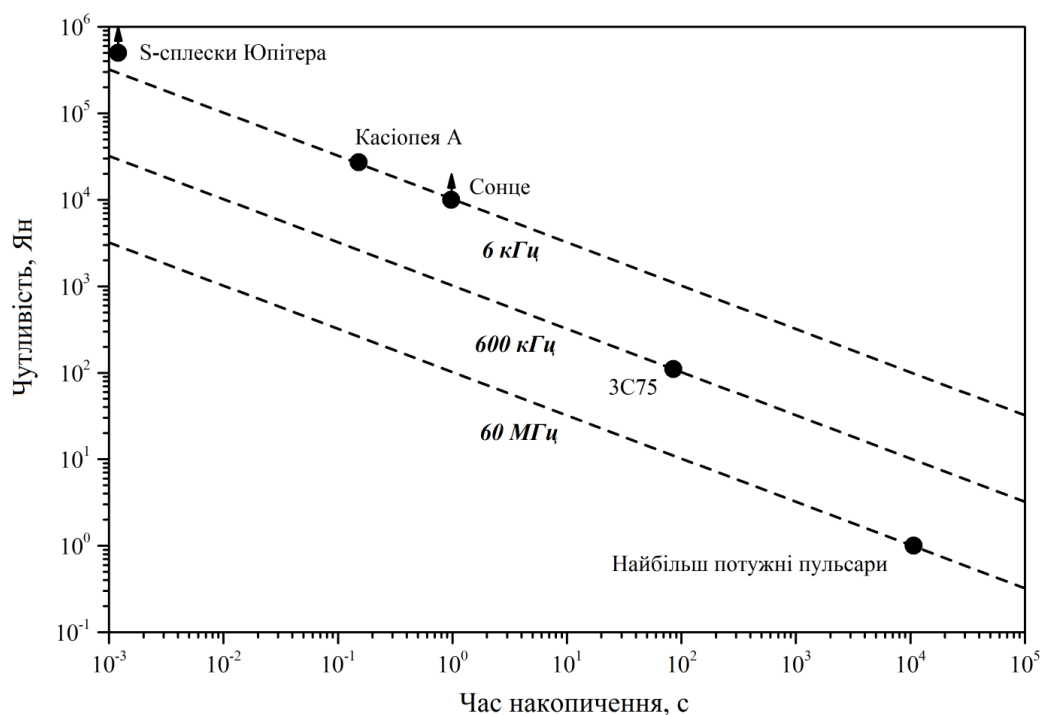


Рис. 3.1. Чутливість субрешітки ГУРТ, яку можна досягти для надійної реєстрації радіовипромінювання космічних радіоджерел.

Якщо пульсари та джерела безперервного випромінювання мають доволі сталі значення потоків радіовипромінювання, то потоки спорадичного випромінювання Сонця та Юпітера можуть змінюватися у дуже широких межах. Тому найкращою оцінкою реальних можливостей НЧ радіотелескопа з невеликою антеною можна вважати лише результати реальних спостережень радіовипромінювання космічних джерел та їх порівняння з результатами спостережень, отриманими на інших НЧ радіотелескопах.

3.2 Дослідження чутливості елементів радіотелескопа ГУРТ за допомогою спостережень добової зміни фонового радіовипромінювання Галактики

На метрових і дециметрових хвилях основною складовою шуму системи є зовнішній шум, джерелом якого є галактичне фонове радіовипромінювання. Практично домінування зовнішнього шуму системи над внутрішніми

шумами доволі легко перевірити за допомогою спостереження добової зміни антенної температури за рахунок нерівномірності розподілення фонового радіовипромінювання на небесній сфері. Якщо внесок власного шуму системи доволі малий, то зміна шумової температури буде помітна на динамічному спектрі, отриманому в результаті спостережень навіть на одному диполі за рахунок добового обертання Землі навколо своєї осі.

Довготривалі спостереження добових змін шумової температури системи за рахунок обертання Землі при фіксованому положенні ДН несуть багато корисної інформації, зокрема такі експерименти добре характеризують стабільність параметрів радіотелескопа (або його складових частин), наочно демонструють завадову ситуацію (радіоастроклімат) на обсерваторії, дають можливість виявляти несправності у системі. Окрім того ці дані несуть інформацію про розподіл фонового випромінювання по небесній сфері і за їх допомогою можна будувати карти такого розподілу. Такі карти були отримані на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2 з високою просторовою роздільною здатністю [6], [107]. Довготривалі спостереження добових змін шумової температури системи для структурних елементів радіотелескопа ГУРТ періодично проводилися на обсерваторії ім. С. Я. Брауде для субрешітки ГУРТ та однієї активної антени – елемента субрешітки ГУРТ.

Окремий антенний елемент радіотелескопа ГУРТ має майже всеспрямовану ДН, що зменшує можливий перепад антенної температури від нерівномірності розподілу фонового шуму по небесній півсфері. Однак за добу такий перепад може сягати 2-3 дБ у робочій смузі частот, що доволі легко зафіксувати. На рис. 3.2 показано динамічний спектр добової зміни антенної температури окремого активного антенного елемента ГУРТ. Для цього експерименту було використано антенний елемент № 5 субрешітки № 9 ГУРТ. Експеримент проводився 4 лютого 2017 року. З рисунку видно, що перепад антенної температури за рахунок добової зміни інтегральної

температури фону на небесній півсфері становить 2.5 ... 3 дБ майже у всьому робочому діапазоні ГУРТ.

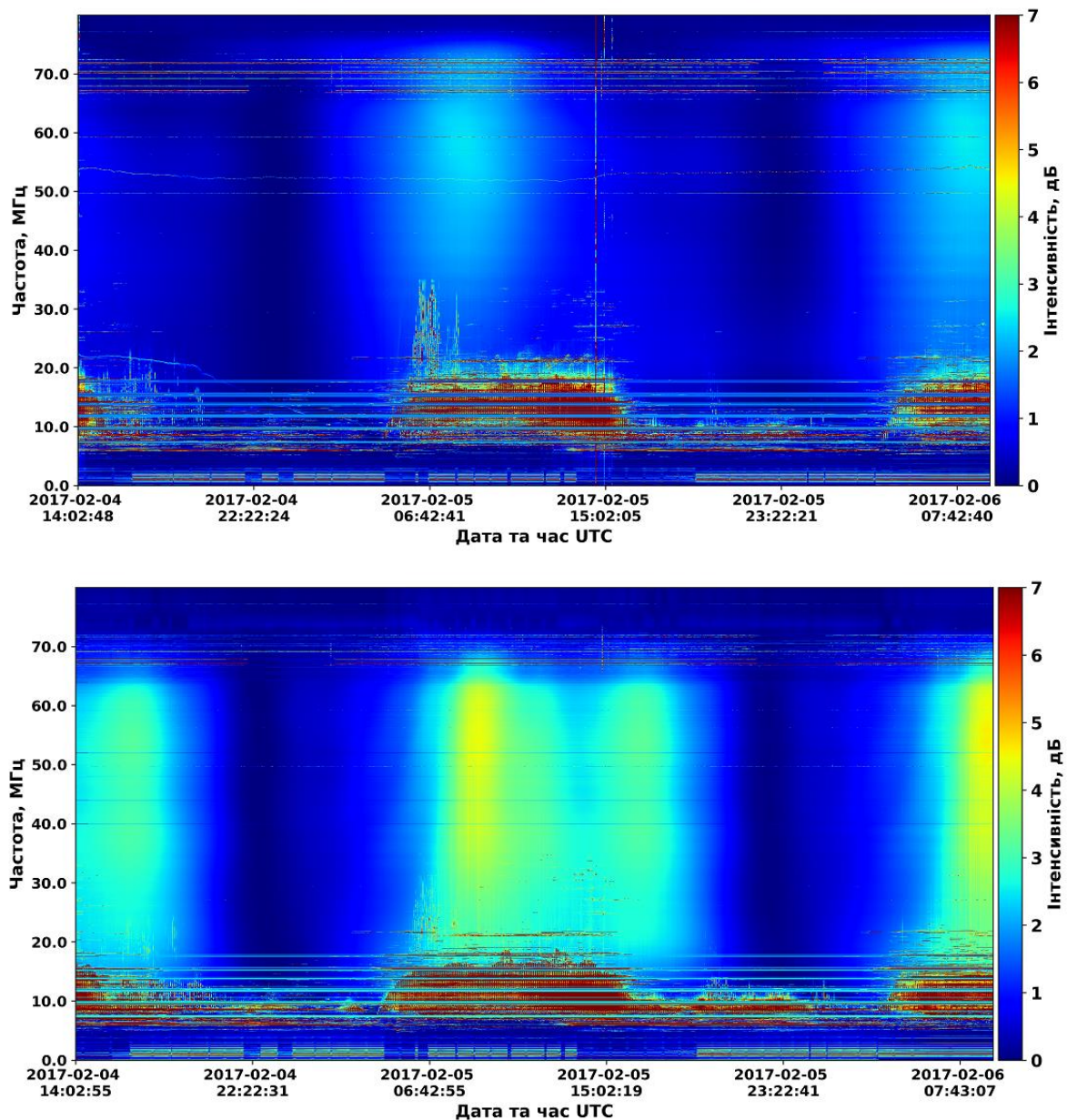


Рис. 3.2. Динамічні спектри добової зміни шумової температури системи активний антенний елемент ГУРТ – приймач ADR (верхня панель) та субрешітка ГУРТ – приймач ADR (нижня панель), що отримані 4 лютого 2017 р. на Радіоастрономічній обсерваторії ім. С. Я. Брауде.

Для субрешітки радіотелескопа ГУРТ перепад антенної температури повинен бути більше ніж для одного елемента, бо субрешітка вже має

значну просторову вибіркковість. На рис. 3.2 наведено динамічний спектр зміни антенної температури при фазуванні субрешітки в зенітному напрямку. З рисунка добре видно, що субрешітка ГУРТ чутлива до перепаду добової зміни галактичного фону від приблизно 10 до 70 МГц, на частотах 30-65 МГц перепад сягає 5 дБ. Визначити нижню межу перепаду антенної температури доволі складно, через те, що вона знаходиться у декаметровому діапазоні з великим рівнем штучних завад. Визначення цієї межі можливе тільки при спостереженнях перепаду фону протягом року та співставленні частин записів, що отримані у нічних час, коли антропогенних завад менше за все. Наявність перепаду антенної температури свідчить про перевищення галактичного шуму над внутрішніми шумами системи, але навіть поза межами діапазону 10-70 МГц радіотелескоп здатен спостерігати радіоастрономічні сигнали, особливо широкосмугові і потужні, такі як сонячні радіосплески. Однак до оцінок абсолютних значень потоків на краях робочого діапазону системи ГУРТ треба ставитись обережно, пам'ятаючи що рівень шумів у цих смугах визначається вже внутрішнім шумом, а не фоном Галактики.

Найкращим тестом та методом калібрування НЧ радіотелескопа є поєднання розрахунку параметрів радіотелескопа, отриманих за допомогою чисельного моделювання, періодична перевірка справності роботи усіх його систем та періодичні спостереження добової зміни антенної температури за рахунок обертання Землі і нерівномірності розподілу галактичного фонового радіовипромінювання по небесній сфері. Чисельне моделювання дає можливість отримати характеристики радіотелескопа для будь-якого режиму роботи з достатньою точністю. Перевірка усіх систем гарантує точність наведення радіотелескопа, участь усіх диполів у формуванні ДН та мінімальні внутрішні шуми системи. Довготривалі спостереження фону дають можливість впевнитися у сталості більшості параметрів системи та сталому перевищенні шуму фону Галактики над власними шумами системи, а значить і чутливості системи до радіоастрономічних сигналів. Додатково

такі дані дають можливість аналізувати завадову ситуацію у місці розташування радіотелескопа та більш вдало планувати спостереження космічних радіоджерел.

На рис. 3.3 показано динамічний спектр добової зміни шумової температури системи субрешітка ГУРТ – приймач ADR, отриманий протягом двох тижнів на субрешітці ГУРТ. Запис проводився з часовою роздільною здатністю 1.7 с та частотною роздільною здатністю 9 кГц. Для отримання динамічного спектра дані спостережень було усереднено до роздільної здатності 562 с на піксель. Для експерименту була використана субрешітка №10, головний промінь якої був направлений у зеніт.

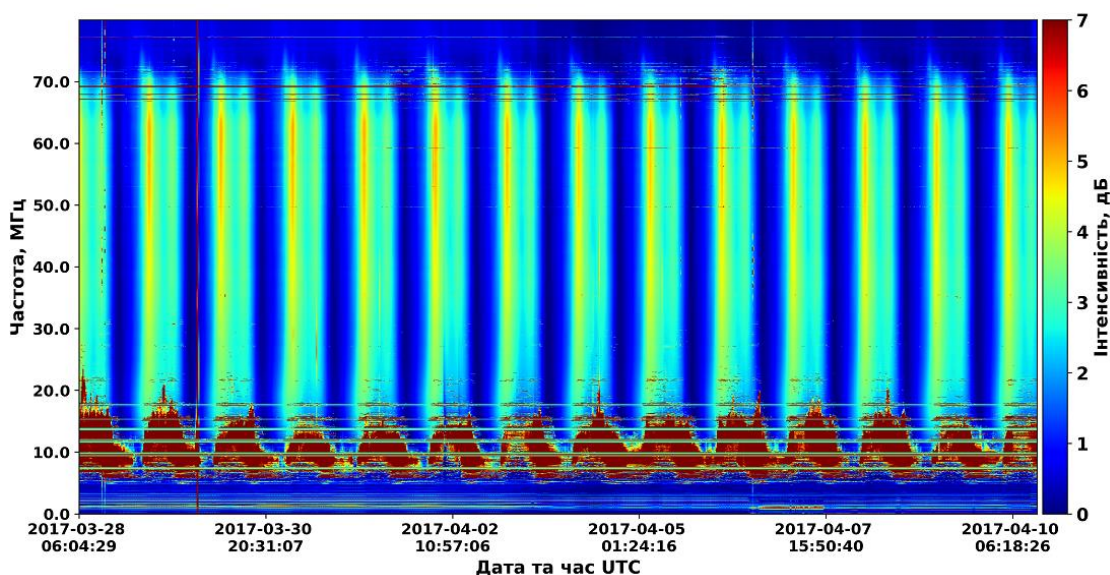


Рис. 3.3. Динамічний спектр добової зміни антенної шумової температури системи субрешітка ГУРТ – приймач ADR у часі, отриманий протягом двох тижнів з 28 березня по 10 квітня 2017 р.

На динамічному спектрі рис. 3.3 добре видно сталий добовий перепад антенної шумової температури на 3-5 дБ у діапазоні частот 10-70 МГц, також видно, що перепад зменшується до 1-2 дБ на частотах 70-80 МГц. На нижніх частотах спектра можна добре розрізнити антропогенні завади від радіостанцій та станцій зондування іоносфери. Видно також повторюваність часу появи завад, їх частотної смуги від доби до доби. Через велике

усереднення в часі може скластися враження, що в окремі години спостерігати на частотах 8-18 МГц неможливо, але це не так. Як було показано вище на прикладі сонячних сплесків, між сигналами радіостанцій та станцій іоносферного зондування є вільні частотні канали та часові проміжки, у яких можна спостерігати радіоастрономічний сигнал. У разі, коли сигнали космічних радіоджерел є широкосмуговими та плавно змінюються у часі, їх характеристики можна доволі точно відновити після очищення даних спостережень від антропогенних радіозавад.

3.3 Детектування різноманітних типів сонячних сплесків як свідчення високої чутливості складових елементів радіотелескопа ГУРТ

Сонячне радіовипромінювання відзначається великою різноманітністю типів спорадичного радіовипромінювання та зазвичай високим потоком випромінювання сплесків. За допомогою радіотелескопа ГУРТ було проведено спостереження майже всіх відомих на метрових і декаметрових хвилях типів випромінювання. Це стало можливим завдяки організації майже цілорічного моніторингового спостереження Сонця за допомогою субрешітки ГУРТ у режимі слідкування, а іноді й одним її елементом.

3.3.1 Спостереження сплесків типів II, III, IIIb, IV

Сплески типів II, III, IIIb, IV є класичними сплесками, що досліджуються у декаметровому і метровому діапазоні вже давно. Реєстрація всіх цих типів сплесків добре ілюструє можливості застосування субрешітки ГУРТ та навіть її одиночного елемента для спостережень сонячного радіовипромінювання у широкій смузі частот. Всі ці типи сплесків є широкосмуговими, тому їх спостереження за допомогою субрешітки ГУРТ має велику перевагу.

На рис. 3.4 показано динамічний спектр сонячного сплеску II типу, що одночасно спостерігався на радіотелескопі УТР-2 та субрешітці радіотелескопа ГУРТ. Спостереження сплеску на субрешітці ГУРТ проводилися з використанням приймача ADR [28], [29] 25 липня 2014 року у повному діапазоні частот 10 – 80 МГц. Добре видно, що широкосмуговість приймальної системи ГУРТ дає можливість отримати значно більше інформації, адже охоплює одразу діапазон частот основної та другої гармоніки випромінювання сплеску [108].

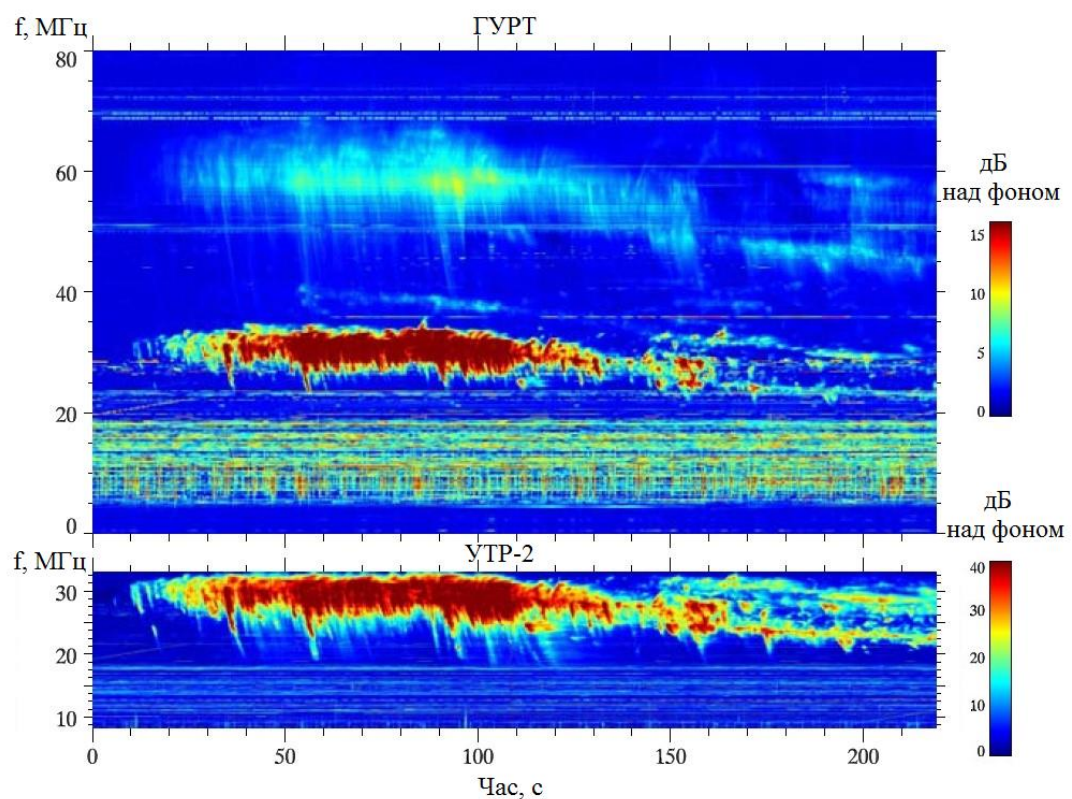


Рис. 3.4. Сонячний сплеск II типу, який був зареєстрований одночасно радіотелескопами УТР-2 та ГУРТ 25 липня 2014 р.

Класичною послідовністю типів сплесків при корональному викиді мас (КВМ) Сонця вважається така послідовність: потужна група сплесків III типу – сплеск II типу – сплеск IV типу. Таку послідовність було зареєстровано субрешіткою ГУРТ 18 квітня 2017 року, її динамічний спектр показано на

рис. 3.5. З рисунку добре видно, що перевищення інтенсивності сплесків III типу над фоновим випромінюванням становить близько 40 дБ, а самі сплески, хоч і з погіршенням чутливості, можна спостерігати навіть до країв смуги 8 – 80 МГц. При великих потоках широкосмугових імпульсів III типу, що за інтенсивністю перевищували фонове випромінювання більш ніж на 30 дБ, вся система працювала в лінійному режимі і не відбулося переповнення АЦП приймача.

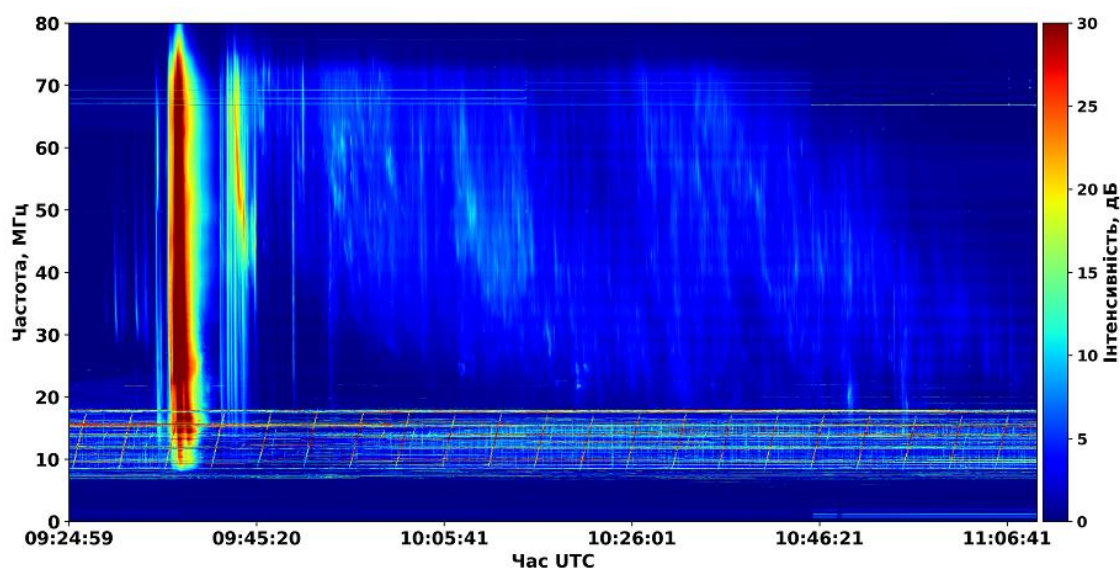


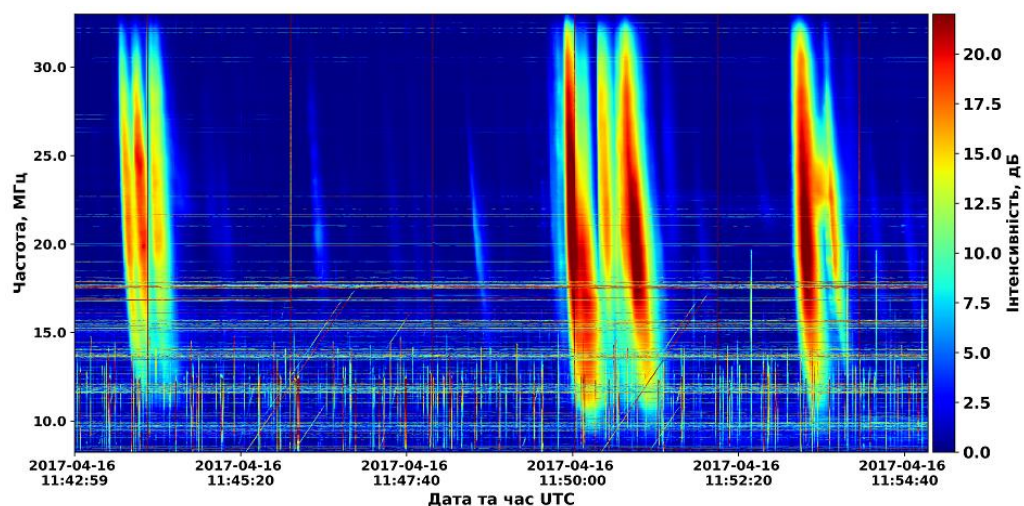
Рис. 3.5. Динамічний спектр класичної послідовності сонячних радіосплесків під час КВМ: група сплесків III типу – сплеск II типу – сплеск IV типу, зареєстрованої за допомогою субрешітки ГУРТ. Інтенсивність показано у дБ над фоном.

Класична послідовність сплесків при КВМ на даному етапі трактується таким чином. Сплески III типу є найпоширенішими сплесками, що спостерігаються у декаметровому і метровому діапазонах радіохвиль. Вони виникають через проходження великої кількості швидких електронів крізь магнітне поле Сонця, тому потужний сплеск III типу, або їх група виникають раніше всіх інших сплесків та є провісниками (прекурсорами) інших сплесків, що пов'язані з КВМ. Сплески II типу виникають за рахунок плазмового механізму випромінювання ударної хвилі, що виникає і рухається

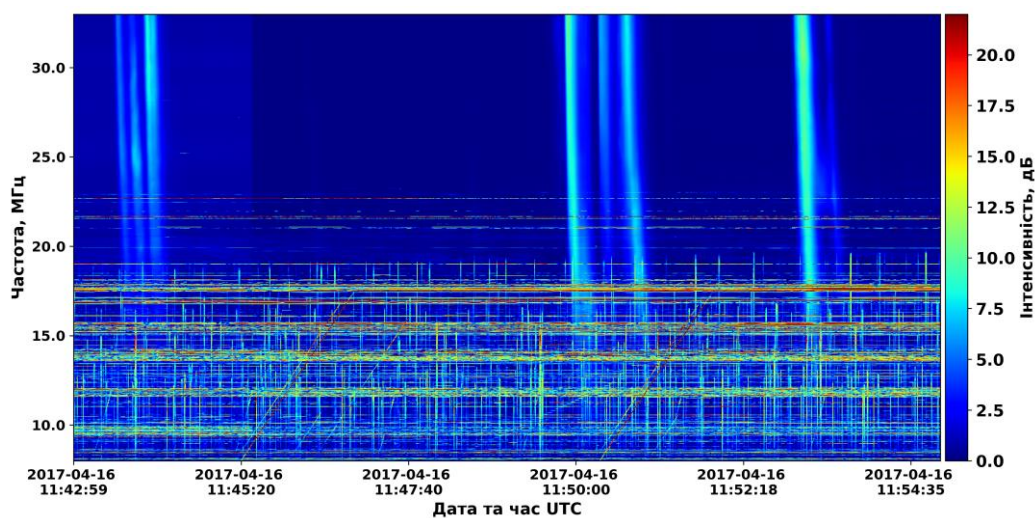
у магнітному полі попереду самого KBM з усіх боків. Сплеск IV типу також виникає як результат плазмового механізму генерації радіовипромінювання самого коронального викиду [109]. Його модуляція у часі скоріш за все має бути пов'язана з пружними коливаннями маси викиду. Під час KBM не завжди виникає класична послідовність, часто сплески IV або II типу не вдається зареєструвати, це зазвичай пояснюється взаємним розташуванням області, з якої відбувся KBM, Сонця та спостерігача.

На прикладі динамічних спектрів спостережень сонячних сплесків III типу також можна показати переваги малих антенних решіток з точки зору більшої рівномірності чутливості як залежності від напрямку променя ДН.

На рис. 3.6 наведено динамічний спектр сонячних радіосплесків, прийнятих одночасно радіотелескопами УТР-2 та ГУРТ 17 квітня 2016 року тривалістю 11 хвилин з початком о 11-43 UTC. Динамічний спектр рис. 3.6 а зареєстровано за допомогою плеча Північ-Південь (1440 диполів) радіотелескопа УТР-2, а на рис. 3.6 б наведено динамічний спектр тих самих сплесків, зареєстрованих за допомогою субрешітки ГУРТ з 25 активних антенних елементів однієї поляризації. Смуга частот візуалізації на цих картинках відповідає смузі частот радіотелескопа УТР-2, а шкала інтенсивності відносно фонового шуму однакова. За таких умов добре видно, що сплески III типу набагато краще можна дослідити на великій антені. До того ж помітна висока просторова вибірковість антени УТР-2, у сигналах якої набагато менше завад.



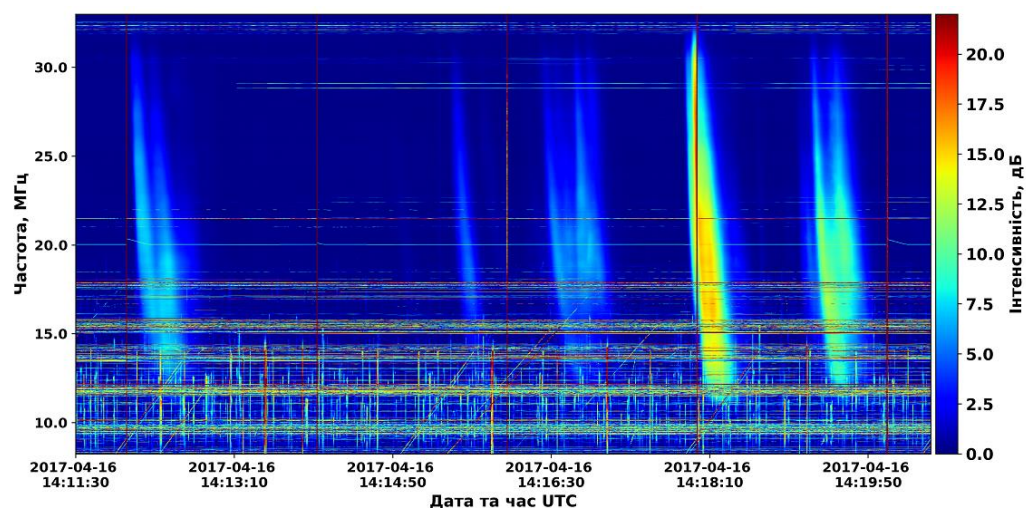
а)



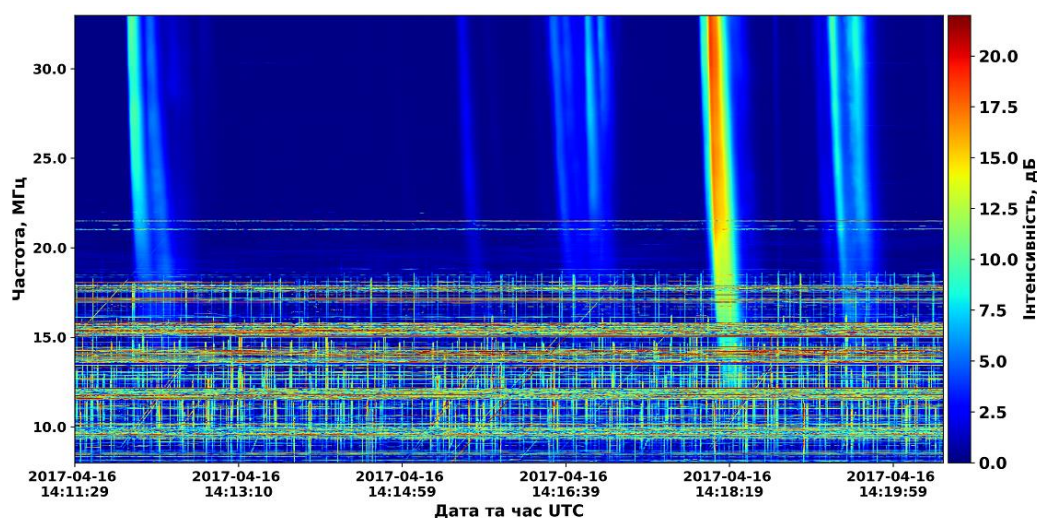
б)

Рис. 3.6. Динамічні спектри сонячних сплесків III типу при прийомі на а) плече Північ-Південь радіотелескопа УТР-2 та б) субрешітку ГУРТ коли Сонце знаходиться біля верхньої кульмінації.

На рис. 3.7 показано аналогічні динамічні спектри але прийняті о 14-10 UTC, коли Сонце знаходиться ближче до горизонту. В цей час плече УТР-2, що розташоване уздовж лінії північ-південь, значно втрачає у ефективності на відміну від малої субрешітки ГУРТ. Тому перевищення потоку сонячних сплесків над фоновим шумом у двох антен практично однакове.



а)



б)

Рис. 3.7. Динамічні спектри сонячних сплесків III типу при прийомі на а) плече Північ-Південь радіотелескопа УТР-2 та б) субрешітку ГУРТ коли Сонце знаходиться далеко від верхньої кульмінації.

3.3.2 Спостереження сплеску U-типу

Вже у 2012 році вперше були проведені короткострокові сеанси спостережень спорадичного радіовипромінювання Сонця у режимі слідкування за допомогою однієї субрешітки радіотелескопа ГУРТ на території Радіоастрономічної обсерваторії ім. С. Я. Брауде. Тоді реєстрація

радіовипромінювання проводилася за допомогою цифрового спектрополяриметра DSPZ, що має два незалежні канали з робочої смугою частот 0 – 33 МГц. Для запису сигналів сонячного радіовипромінювання у всій робочій смузі ГУРТ застосовувалася схема, згідно з якою DSPZ виконував реєстрацію сигналів у смузі 10 – 33 МГц в одному з своїх каналів, а в іншому каналі – у смузі 33 – 66 МГц.

Отримані таким чином динамічні спектри половинної ширини поєднувалися у один за допомогою спеціально створеної програми. Не дивлячись на суттєво меншу ніж у УТР-2, ефективну площу субрешітки ГУРТ та її широку ДН, протягом сесії спостережень було зареєстровано як звичайні сплески III типу, так і їх різновид – сонячні U-сплески. Проведення реєстрації у широкій смузі частот значно підвищило імовірність реєстрації гармонічно зв'язаних пар сплесків.

З усіх сплесків, що спостерігалися протягом 14 днів, найбільшу цікавість викликає U-сплеск, що було зареєстровано 8 серпня 2012 р. у верхній частині частотного радіодіапазону. Сплеск мав добре помітні спадаючу гілку та частоту повороту 50 МГц. Максимальне перевищення потоку сплеску над рівнем фонового випромінювання спостерігалось у точці повороту та склало 17 дБ. Одночасно у нижній частині частотного діапазону радіотелескопа також був зареєстрований U-сплеск з частотою повороту близько 25 МГц та перевищенням інтенсивності над фоном у 6 дБ (рис. 3.8). Дворазова різниця між частотами повороту цих сплесків, а також майже одночасне їх спостереження вказує на те, що дані сплески можуть бути гармонійно пов'язаною парою сплесків.

Наявність на динамічному спектрі точок повороту, які можна добре розрізнити, робить цю пару сплесків цінною з точки зору можливості оцінки реального гармонійного відношення та реальної часової затримки приходу випромінювання першої гармоніки відносно другої.

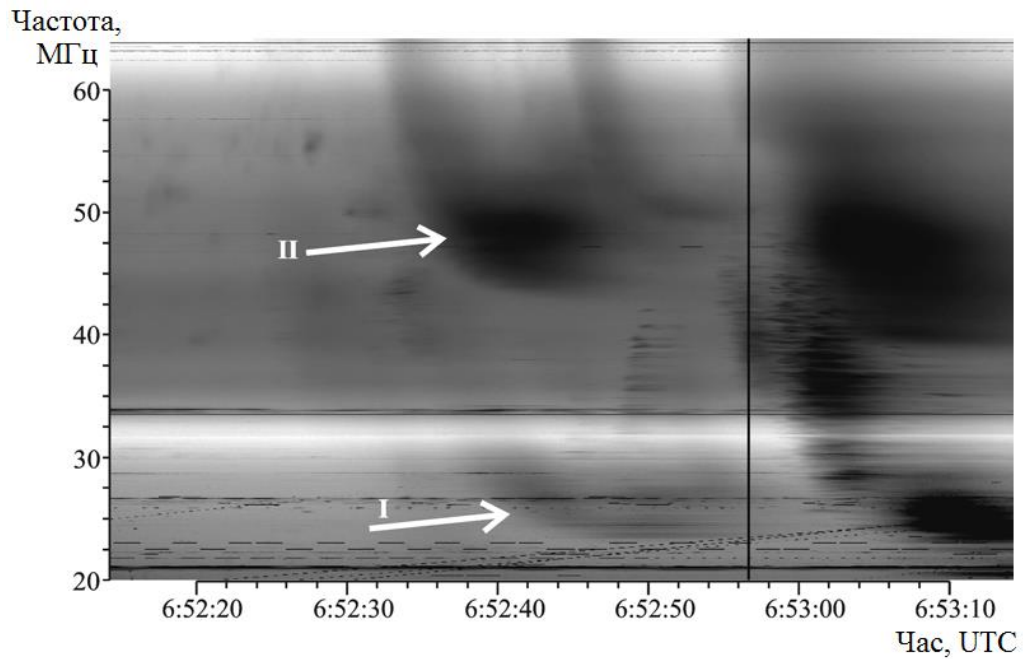


Рис. 3.8. U-сплеск з гармонійною структурою: I – основна гармоніка випромінювання, II – друга гармоніка.

Одночасні спостереження, що виконувалися на радіотелескопі УТР-2, показали перевищення сигналу над фоном для першої гармоніки близько 15 дБ на частоті 27 МГц, в той час як потік радіовипромінювання не перевищував $3 \cdot 10^{-21} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ (або 30 сонячних одиниць потоку, с. о. п.). Зрозуміло, що менше перевищення сплеску над рівнем фону у спостереженнях на субрешітці ГУРТ пояснюється її меншою ефективною площею та ширшою головною пелюсткою ДН.

Швидкості частотного дрейфу гілок сплеску, що сходять, на обох гармоніках були трохи менше, ніж у близьких за часом сплесків III типу, що характерно для цього типу сплесків [110], [111]. Так для першої гармоніки швидкість частотного дрейфу за даними спостережень на ГУРТ та УТР-2 склала біля -2.5 МГц/с (частота 31 МГц), а швидкість дрейфу другої гармоніки – біля 7 МГц/с (частота 63 МГц). В обох випадках швидкості дрейфу, що спостерігаються, відповідають радіальній швидкості джерела у короні Сонця, яка згідно з моделлю корони Баумбаха-Алена [112] складає $0.11 \div 0.12$ від швидкості світла.

Детальний аналіз цієї гармонічної пари показує, що у формуванні відношення частот першої та другої гармонік випромінювання, що прийняті радіотелескопами, головний внесок дає затримка приходу першої гармоніки відносно другої. У даному випадку частоти точок повороту гармонічних компонент дорівнюють 25 та 50 МГц. Зміна знаку частотного дрейфу другої гармоніки відбувається на 7,5 с раніше ніж першої. Оскільки плазмовий механізм випромінювання передбачає формування основної та другої гармоніки одночасно й в одному місці, то затримка, що спостерігається, може виникнути при поширенні хвилі від джерела до спостерігача [113].

3.3.3 Спостереження сплесків типу «дрейфуюча пара»

Сплески типу «дрейфуюча пара» спостерігаються у метровому та декаметровому діапазонах хвиль, та мають структуру у вигляді двох нахилених смужок з однаковою швидкістю дрейфу по частоті, до того ж для різних дрейфуючих пар ця швидкість може бути як додатною, та і від'ємною. Потоки таких сплесків помірні, тому для їх спостереження необхідні телескопи з більшою чутливістю, ніж для спостереження основної популяції сонячних радіосплесків. Поки у літературі немає чітких моделей випромінювання таких сплесків, а ті, що є, неповно описують їхні характеристики, тому дослідження цього типу сплесків є дуже актуальною задачею, зокрема цікаво дослідити їхні статистичні розподіли за швидкістю дрейфу [114].

12 липня 2017 року на обсерваторії ім. С. Я. Брауде проводилися одночасно спостереження сонячного радіовипромінювання на радіотелескопі УТР-2 (плече Північ та плече Захід, одна лінійна поляризація), на субрешітці № 10 ГУРТ та на окремому диполі № 1 субрешітки № 9 ГУРТ (дві лінійні поляризації). У цей день спостерігалася доволі висока сонячна активність, хоча потік сплесків цілий день був помірним, зокрема спостерігалися сплески типу дрейфуюча пара, що само по собі є доволі рідкісним явищем.

На рис. 3.9 – 3.10 представлені динамічні спектри сонячних сплесків. Спектр на рис. 3.9 був отриманий за допомогою плеча Північ-Південь радіотелескопа УТР-2 та приймача DSPZ у діапазоні 8 – 33 МГц з часовим розрізненням 100 мс і шириною частотного каналу 4 кГц в режимі стеження ДН радіотелескопа УТР-2 за Сонцем. Період перемикання положення ДН УТР-2 становив 120 секунд. Посередині рисунка видно вузьку вертикальну смугу, що відповідає перемикаючому напрямку ДН антенної решітки радіотелескопа. Спектри на рис. 3.10 отримані за допомогою субрешітки № 10 та одного антенного елемента субрешітки №9 ГУРТ на приймачах ADR у діапазоні 8 – 80 МГц з часовим розрізненням 100 мс і шириною частотного каналу 9,7 кГц.

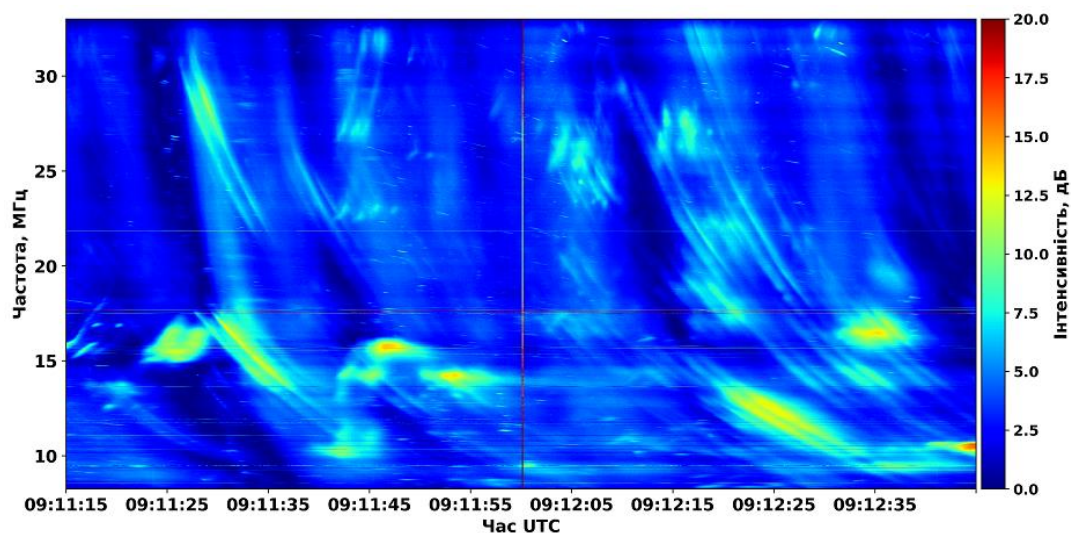


Рис. 3.9. Динамічний спектр радіовипромінювання Сонця, отриманий за допомогою північного плеча радіотелескопа УТР-2 та приймача DSPZ у смузі частот 8 – 33 МГц з часовим розділенням 0.1 с.

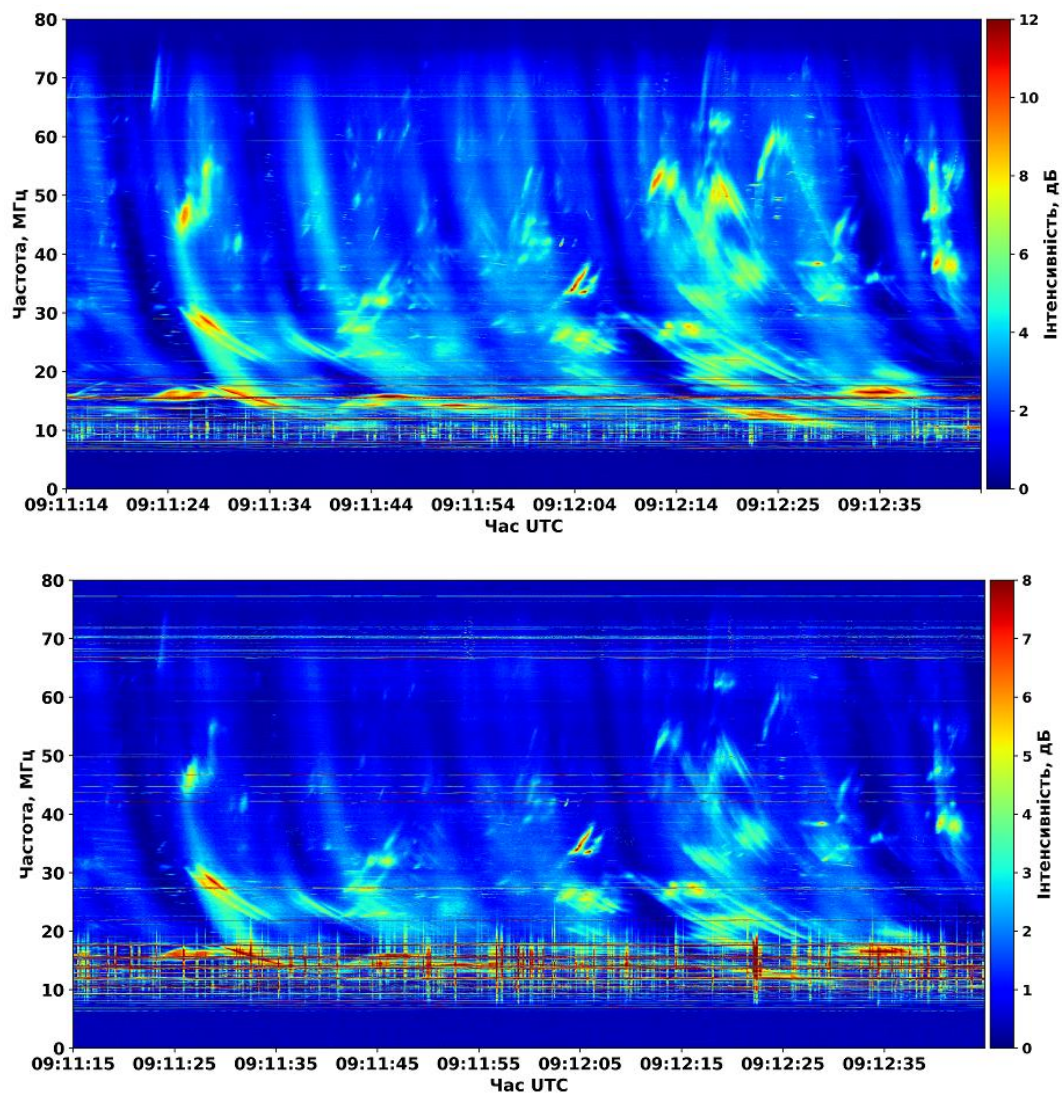


Рис 3.10. Динамічний спектр радіовипромінювання Сонця, отриманий за допомогою субрешітки №10 радіотелескопа ГУРТ (верхня панель) і диполя №1 субрешітки №9 ГУРТ (нижня панель) у смузі частот 8 – 80 МГц.

Як можна бачити з рисунків, сплески типу дрейфуюча пара добре простежуються на динамічних спектрах, отриманих не тільки за допомогою плеча Північ-Південь радіотелескопа УТР-2, а й на субрешітці ГУРТ, а найпотужніші з них і на поодинокому антенному елементі ГУРТ. Тобто чутливості елемента ГУРТ достатньо для вивчення найпотужніших сплесків типу дрейфуюча пара. Навіть при спостереженні на один антенний елемент відношення С/Ш (в даному випадку перевищення над фоновим

радіовипромінювання Галактики) для таких сплесків досягає значення 5. Варто зазначити, що на даних спостережень за цей день з радіотелескопів NDA та e-Callisto сплесків типу дрейфуюча пара не простежується [114].

Простим підрахунком встановлено, що кількість дрейфуючих пар за день 12 липня на динамічних спектрах, отриманих за допомогою субрешітки радіотелескопа ГУРТ у частотному діапазоні 30–70 МГц (поза межами робочого діапазону радіотелескопа УТР-2, інші частоти були доволі сильно вражені антропогенними завадами), дорівнює 2602 дрейфуючі пари, з яких 2178 зі зворотнім частотним дрейфом, а 424 – з прямим. Варто зазначити, що спостереження за допомогою радіотелескопа УТР-2 проводилися у проміжку часу ± 3 години від кульмінації. Взагалі максимальний рекомендований для спостережень діапазон кутів відхилення ДН радіотелескопа УТР-2 становить ± 4 години від зеніту. Субрешітка ГУРТ має невеликі розміри, її ортогональні диполі на дві лінійні поляризації орієнтовано під 45° відносно сторін світу, ДН кожного диполя мало залежить від напрямку у широкому секторі кутів, система фазування розрахована на максимальне відхилення променя від зеніту, тому субрешітка ГУРТ дає можливість проводити спостереження від сходу джерела до його заходу за горизонт з достатньою чутливістю. Тому за допомогою субрешітки ГУРТ було можливо спостерігати дрейфуючі пари від сходу до заходу Сонця, окрім того в ширшій смузі частот ніж для радіотелескопа УТР-2. Це пояснює більшу кількість дрейфуючих пар, зареєстровану за допомогою субрешітки ГУРТ у порівнянні з кількістю зареєстрованою радіотелескопом УТР-2 в той самий день.

Достатня чутливість для спостереження сплесків типу дрейфуюча пара демонструє що окремий антенний елемент ГУРТ або система з декількох елементів можуть бути використані для створення радіотелескопа на поверхні Місяця [115]. Спостереження цього типу сплесків зараз обмежено у частоті іоносферною межею 8 МГц, але відомо, що такі сплески можуть спостерігатися на більш низьких частотах. Їх дослідження можливе тільки за допомогою радіотелескопа, винесеного за межі земної іоносфери.

Використання антенного елемента ГУРТ у ролі такого радіотелескопа дасть можливість досягти необхідної чутливості, а відсутність земної іоносфери та антропогенних завад, що блокувалися б товщею місячного ґрунту, робить дослідження сплесків типу дрейфуюча пара можливим при відповідному налаштуванні антенного елемента.

3.4 Детектування L та S типів сплесків декаметрового радіовипромінювання Юпітера

Декаметрове радіовипромінювання Юпітера є одним з найпотужніших у Сонячній системі і виникає на частотах до 40 МГц. Розрізняють два основні види сплесків такого випромінювання: L-сплески (довготривалі порівняно вузькочастотні сплески) та S-сплески (короткочасні потужні сплески з дрейфом по частоті). Спостерігати дане випромінювання із Землі можна не завжди, а тільки коли ДН випромінювання направлена у бік нашої планети. До недавнього часу вважалося, що декаметрове випромінювання Юпітера повністю викликане струменевою трубкою Юпітер-Іо, що пов'язує планету та її супутник уздовж силових ліній магнітного поля Юпітера, що проходять крізь Іо. У статті [116] автори на основі даних багаторічних моніторингових спостережень показали, що виникнення такого випромінювання пов'язано не тільки з Іо, але і з супутником Ганімед. Також є свідчення про випромінювання, пов'язане із супутниками Калісто та Амальтея. Прийти до такого висновку допоміг аналіз даних багаторічних спостережень на радіотелескопі NDA та співставлення часу появи випромінювання з періодом обертання супутників. Це ще раз демонструє важливість постійних моніторингових спостережень різних типів космічного радіовипромінювання для чого підходить субрешітка ГУРТ у якості окремого інструмента.

Спостереження декаметрового радіовипромінювання Юпітера проводилися за допомогою радіотелескопа ГУРТ. Субрешітки ГУРТ, разом з

українськими радіотелескопами УТР-2 та УРАН, включені до наземної підтримки космічної місії Juno [117]. Під час потужних штормів радіовипромінювання Юпітера добре видно на динамічних спектрах, отриманих за допомогою субрешітки ГУРТ, однак потік радіовипромінювання сильно змінюється від сеансу до сеансу спостережень. Приклад L- та S-сплесків, зареєстрованих на субрешітці ГУРТ 18 травня 2017 року, наведено на рис. 3.11. На рисунку добре видно сплески обох типів, а також радіочастотні завади від земних блискавок (вертикальні лінії) та радіостанцій (горизонтальні лінії). Для порівняння на рис. 3.12 показано динамічний спектр, отриманий в цей же час за допомогою плеча Півні-Південь радіотелескопа УТР-2.

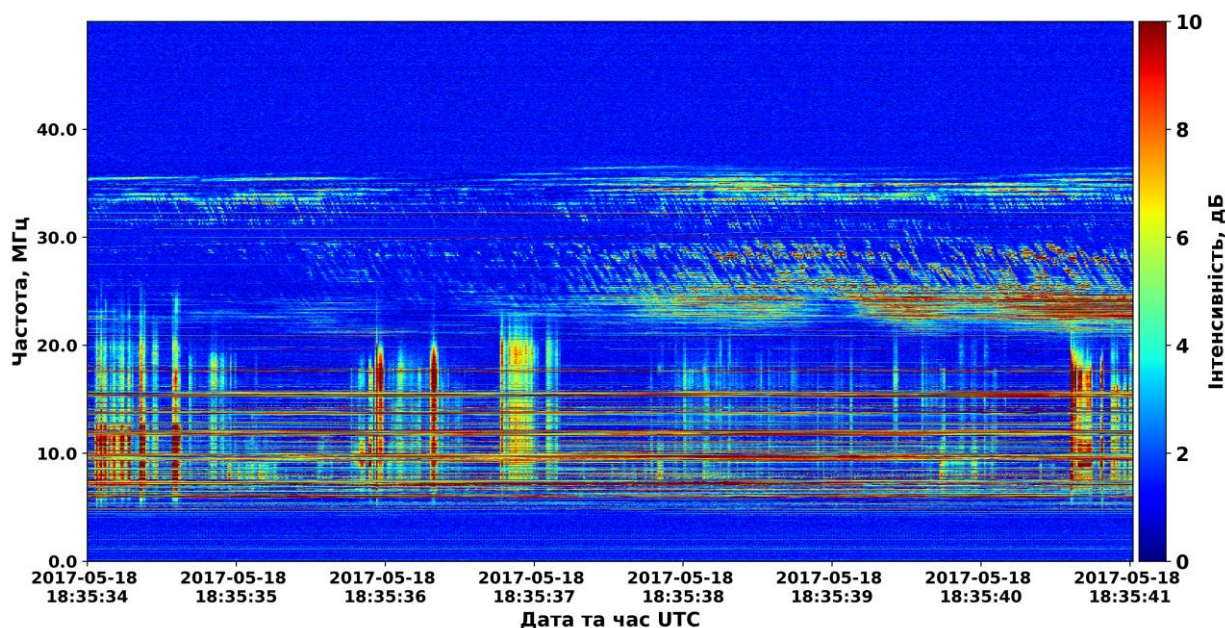


Рис. 3.11. Приклад реєстрації L- та S-сплесків декаметрового радіовипромінювання Юпітера на динамічному спектрі, отриманому за допомогою субрешітки ГУРТ.

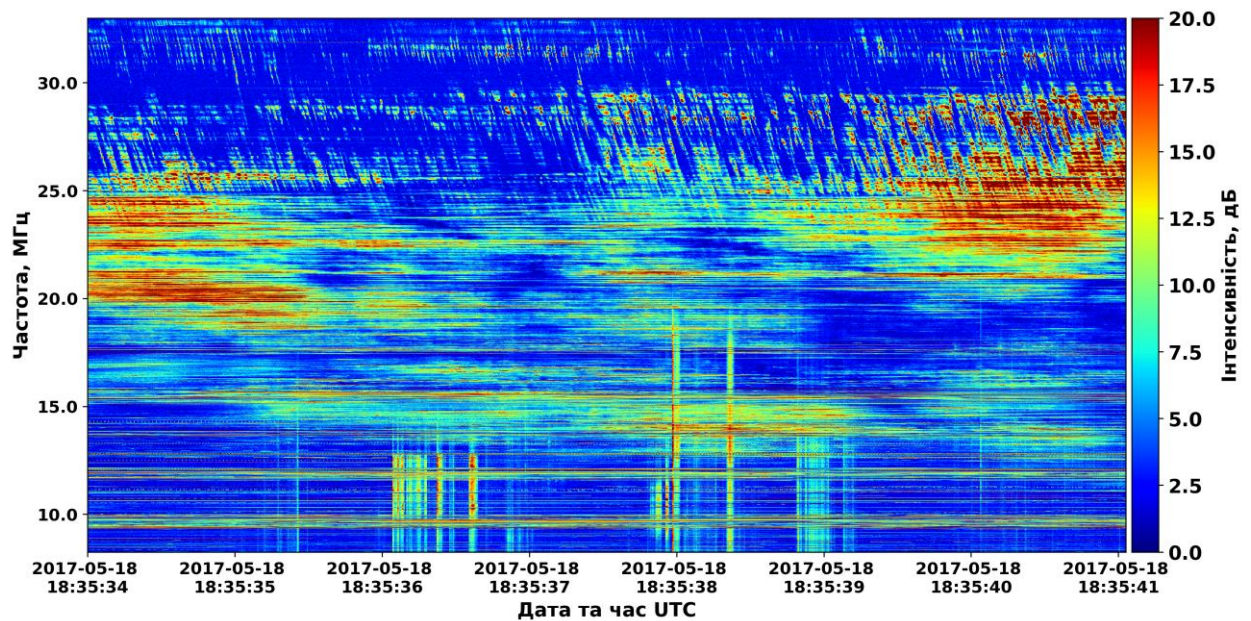


Рис. 3.12. Приклад реєстрації L- та S-сплесків декаметрового радіовипромінювання Юпітера на динамічному спектрі, отриманому за допомогою плеча Північ-Південь радіотелескопа УТР-2.

Радіовипромінювання Юпітера зазвичай має високий ступінь кругової поляризації. Дві лінійні поляризації диполів ГУРТ дають можливість приймати дві ортогональні компоненти випромінювання незалежно, а при їх складанні на динамічному спектрі, можна отримати повну картину частотно-часової структури радіовипромінювання. На рис. 3.13 наведено динамічні спектри, що отримані субрешітками окремо двох лінійних поляризацій, де добре видно лінійчасту структуру спектра, що виникає внаслідок Фарадеевського обертання площини поляризації. На рис. 3.14 наведено динамічний спектр суми сигналів двох лінійних поляризацій. На цьому спектрі лінійчата структура вже не проступає, а частотно-часові особливості радіовипромінювання складають повну картину.

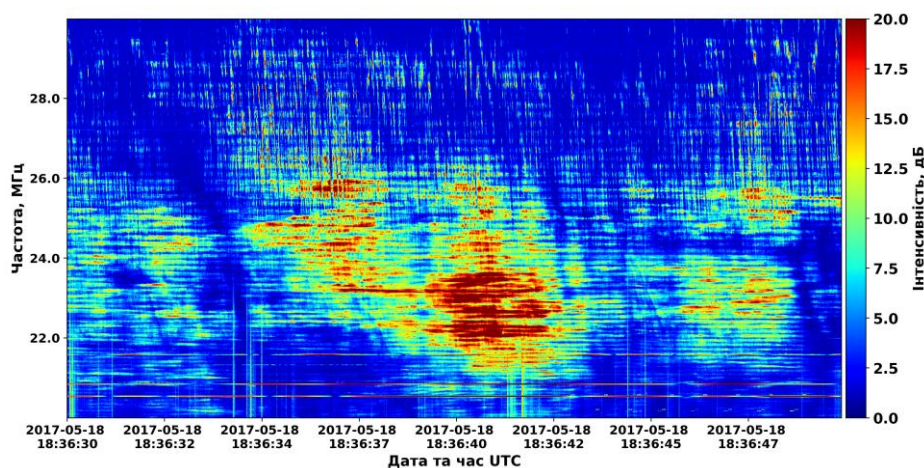
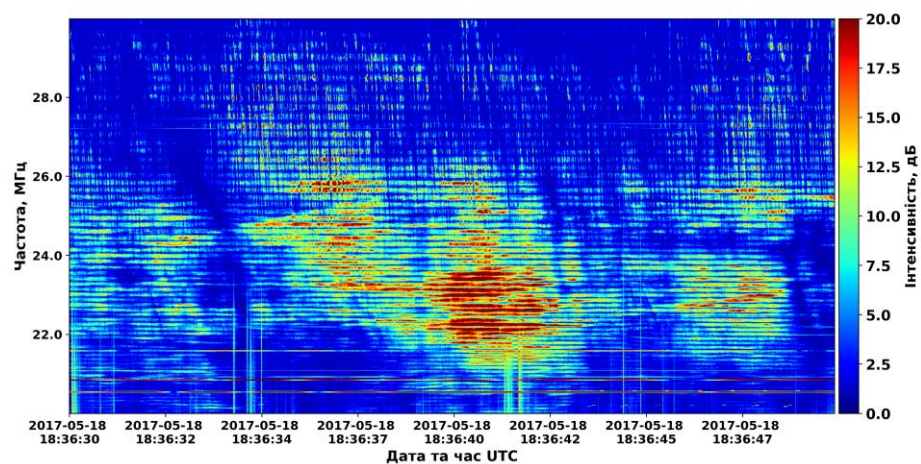


Рис. 3.13. Динамічні спектри сигналів декаметрового радіовипромінювання Юпітера, прийняті за допомогою антен двох ортогональних поляризацій субрешітки ГУРТ (верхня і нижня панелі).

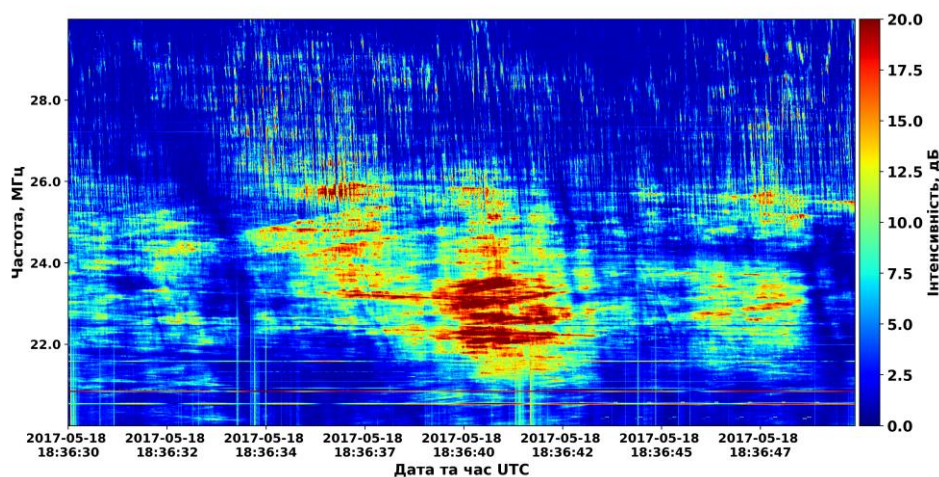


Рис. 3.14. Динамічний спектр суми сигналів декаметрового радіовипромінювання Юпітера, прийнятих антенами двох ортогональних поляризацій субрешітки ГУРТ.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У даному розділі показано, що існує досить великий перелік джерел, для яких єдиним обмежуючим фактором при радіоастрономічних спостереженнях є лише флуктуаційна чутливість радіотелескопа. Оцінено можливості спостереження різних типів радіовипромінювання за допомогою субрешітки ГУРТ на основі даних моделювання характеристик субрешітки ГУРТ з розділу 2 та досвіду спостережень на радіотелескопі УТР-2 та системі УРАН. Підтверджено можливості спостережень космічних радіоджерел на прикладі отриманих динамічних спектрів добової зміни видимого фонового випромінювання Галактики за рахунок обертання Землі, радіовипромінювання активного Сонця, зокрема сплесків різних типів, декаметрового радіовипромінювання Юпітера. Результати обробки отриманих даних підтверджують правильність теоретичних оцінок та добре ілюструють можливості використання субрешітки ГУРТ і антенного елемента ГУРТ для радіоастрономічних спостережень як у складі всього радіотелескопа, так і як окремого інструмента.

Радіовипромінювання активного Сонця досліджується вже багато років, але багато типів та частотно-часових особливостей такого випромінювання, особливо у декаметровому і метровому діапазонах хвиль потребують уточнень фізичних моделей своєї появи у короні Сонця. Частотно-часові особливості такого випромінювання дають можливість відтворювати не тільки загальні параметри середовища, але й геометрію деяких процесів у сонячній короні. За результатами постійного спостереження Сонця зареєстровано майже всі типи сплесків, що відомі на декаметрових та метрових частотах. За допомогою субрешітки та окремого антенного елемента ГУРТ зареєстровано не тільки потужні сплески II, III, IV типів, але й випромінювання помірної потужності: сплеск U-типу та типу дрейфуюча пара.

Таким чином, вперше у широкій смузі частот декаметрового та метрового діапазонів хвиль зареєстровано сонячні сплески II типу з гармонікою на подвійній частоті з великою чутливістю та роздільною здатністю. Вперше детектовано у широкій смузі частот сплески типу дрейфуюча пара на субрешітку та навіть на один диполь завдяки високій чутливості системи активний диполь – приймач ГУРТ. Зареєстровано U-сплеск на основній та другій гармоніці, що дало можливість визначення параметрів плазми у верхній короні Сонця.

Основні положення та результати цього розділу викладені в публікаціях автора [6], [24], [28], [113], [114], [118].

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СУБРЕШІТКИ РАДІОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

Відкриття пульсарів завдяки випадковій реєстрації їх радіовипромінювання під час спостережень мерехтінь у 1967 році дослідниками Кембриджського університету Джойселін Белл та Ентоні Хьюішем, про яке було сповіщено у статті [119], дало абсолютно нові можливості дослідження Всесвіту інструментами радіоастрономії. Специфічні сигнали, імпульси, що мають точний час повторення за рахунок обертання масивної нейтронної зірки навколо своєї осі, дають можливість досліджувати не тільки їх джерело але і оцінювати параметри середовища поширення сигналу у космосі та, можливо, навіть реєструвати гравітаційні хвилі, які нещодавно були відкриті новим типом спостережної астрономії [120].

Спостереження радіовипромінювання пульсарів у декаметровому і метровому діапазонах радіохвиль має багато особливостей, що можуть бути одночасно як перевагами, так і недоліками для спостережень. На низьких частотах при спостереженнях якнайкраще проявляються ефекти впливу середовища поширення радіохвиль, такі як частотна дисперсія, розсіювання та обертання площини поляризації за рахунок ефекта Фарадея.

Частотна дисперсія полягає у виникненні залежності швидкості поширення хвиль у міжзоряному середовищі від частоти. Хвилі нижчих частот мають меншу швидкість, а значить приходять до спостерігача із затримкою відносно хвиль вищих частот. Величиною, що характеризує таку затримку є міра дисперсії з розмірністю $\text{пк} \times \text{см}^{-3}$. Міра дисперсії імпульсів однозначно вказує на кількість електронів на промені зору від нейтронної зорі до спостерігача [121] у стовпі перерізом 1 см^2 , про що свідчить її розмірність:

$$DM = \int n_e \cdot ds \quad (4.1)$$

де: DM – міра дисперсії, n_e – об’ємна густина електронів у середовищі.

При спостереженнях пульсарів дисперсія проявляється як затримка появи імпульсу від пульсара на нижніх частотах відносно верхніх. Розрахувати такий час затримки можна за формулою [122]:

$$\Delta t = \frac{DM \cdot 10^{16}}{2.410331} \left(\frac{1}{f_{\min}^2} - \frac{1}{f_{\max}^2} \right) \quad (4.2)$$

де f_{\min} та f_{\max} верхня та нижня частоти між якими розраховується час затримки.

Розсіяння виникає через накладання хвиль що пройшли різні шляхи від джерела до спостерігача через заломлення на неоднорідностях середовища поширення, та вказує на наявність таких неоднорідностей у середовищі [123]–[125]. Кількісно з даних спостережень розсіяння імпульсу пульсара оцінюється за допомогою сталої часу розсіяння, що вимірюється у секундах.

Обертання площини поляризації за рахунок ефекту Фарадея вказує на величину магнітного поля у міжзоряному середовищі [126]. Вплив цього ефекту оцінюється величиною міра обертання (розмірність рад / м²):

$$RM = 0.81 \int n_e \mathbf{B} \cdot ds \quad (4.3)$$

де: RM – міра обертання, \mathbf{B} – вектор магнітної індукції.

При спостереженнях радіовипромінювання пульсарів антеною лінійної поляризації ефект проявляється як модуляція інтенсивності імпульсів по частоті на динамічному спектрі. Зафіксувати прояв цього явища і, відповідно, виміряти міру обертання можливо лише на індивідуальних (неусереднених) імпульсах.

Значення міри дисперсії у парі з моделлю середовища поширення дозволяють оцінити відстань до пульсара. Більша точність визначення міри дисперсії робить можливим фіксування її флуктуацій з часом, які можуть

свідчити про зміну кількості електронів у середовищі поширення, тобто про рух хмар іонізованого газу у міжзоряному просторі.

Однозначно до ускладнюючих факторів спостереження пульсарів слід віднести НЧ «завал» спектра їхнього випромінювання, що для деяких пульсарів проявляється на частотах 50-200 МГц [31], [127], [128], а також всі інші фактори, що ускладнюють спостереження НЧ радіоастрономії, такі як висока яскравісна температура галактичного фону, дія іоносфери, високий рівень штучних та природніх завад, тощо. Вплив всіх цих факторів разом дозволяє спостерігати тільки близько 45 пульсарів при накопиченні сигналу впродовж 2 годин на декаметрових хвилях за допомогою найбільшого в світі радіотелескопа УТР-2 [127]. Всього за даними спостережень у всіх діапазонах електромагнітних хвиль на даний час відомо близько 2800 пульсарів [129], [130].

Метою даного розділу є дослідження радіовипромінювання пульсарів у метровому діапазоні довжин хвиль за допомогою малорозмірної субрешітки НЧ радіотелескопа ГУРТ. Крім цього, для визначення спектральних характеристик радіовипромінювання у широкій смузі частот, ми розробимо та випробуємо методику спільних спостережень радіовипромінювання пульсарів у метровому та декаметровому діапазонах довжин хвиль на радіотелескопах ГУРТ та УТР-2, відповідно.

4.1 Оцінка можливості реєстрації радіовипромінювання пульсарів за допомогою субрешітки радіотелескопа ГУРТ

Очевидною перепоною для реєстрації імпульсного випромінювання пульсарів та отримання його спектральних характеристик у діапазоні частот 10-70 МГц для нас є мала ефективна площа субрешітки ГУРТ, параметри якої описані у попередніх розділах та статтях [93], [96]–[99], через яку неможливо дослідити поодинокі імпульси пульсарів як це зроблено у роботах

[131], [132]. Тому оцінимо потенційну можливість детектування усереднених імпульсів пульсарів за допомогою субрешітки радіотелескопа ГУРТ.

Якщо використовувати суму сигналів від антен двох ортогональних поляризацій субрешітки ГУРТ, то ефективна площа у діапазоні 30 – 70 МГц складає приблизно 350 м², що у 400 разів менше за ефективну площу радіотелескопа УТР-2 у діапазоні 10 – 30 МГц, (140 000 м² на середній частоті діапазону). За рахунок одночасного приймання хвиль двох ортогональних поляризацій, ми отримуємо виграш у чутливості субрешітки ГУРТ у два рази, порівняно з диполями однієї лінійної поляризації у УТР-2. Однак, з іншого боку для усереднених імпульсів пульсарів є фактори, які покращують можливість реєстрації такого випромінювання у суміжній смузі частот. Наприклад, яскравісна температура галактичного фону у середньому по небесній сфері залежить від частоти приблизно як $f^{-2.55}$, тобто при середніх частотах для УТР-2 і ГУРТ у 20 та 50 МГц відповідно, температура галактичного фону на середній робочій частоті ГУРТ менше у 10.3 разів ніж на середній частоті робочого діапазону УТР-2.

Потік так званих «секундних» пульсарів, період обертання яких близький до 1 с, у НЧ діапазоні, як правило, зростає з частотою у степеневій залежності з показником степеня 1...4. Тобто у випадку, якщо у пульсара спектральний індекс дорівнює одиниці, то сигнал пульсара отриманий на субрешітці ГУРТ у порівнянні з УТР-2 буде у $200 / (10.3 \times 2.5) = 7.8$ разів менше.

На низьких частотах внутрішній шум системи у правильно спроектованого радіотелескопа є малим (у 7–10 разів менший) у порівнянні з фоновим шумом Галактики, що приймається антеною, тому системну шумову температуру можна у першому наближенні замінити яскравісною температурою фонового радіовипромінювання. Тоді вираз (2.4) для визначення флуктуаційної чутливості системи при отриманні усереднених імпульсів пульсарів набуває вигляд:

$$\Delta S_{\min} = \frac{SNR \cdot l \cdot k_B T_{sky}}{A_e \sqrt{\Delta t \cdot \Delta f \cdot (\tau_p / P)}} \quad (4.4)$$

SNR – співвідношення сигнал/шум, яке необхідне для впевненого виявлення усередненого імпульсу на фоні шумів;

l – параметр, який характеризує взаємодію поляризації ЕМ хвилі, що падає на антену та поляризації приймальної антени (для неполяризованої хвилі та лінійно поляризованої антени $l = 2$, для такої ж хвилі, але антени з двома лінійними поляризаціями $l = 1$);

τ_p – тривалість імпульсу пульсара;

P – період повторення імпульсів пульсарів;

Для часу накопичення у 4 години радіовипромінювання пульсара В1133+16 у смузі частот 40 МГц і тривалості його імпульсів у $0.1P$, відношення С/Ш для субрешітки ГУРТ з урахуванням величини середньої по діапазону температури фону Галактики, смуги частот спостережень та антенної системи двох лінійних поляризацій складатиме:

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{\Delta S \cdot A_e \sqrt{\Delta t \cdot \Delta f \cdot (\tau_p / P)}}{l \cdot k_B \cdot T_{bg}} = \\ &= \frac{0.6 \cdot 10^{-26} \cdot 10 \cdot 350 \sqrt{15 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 0.1}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 5 \cdot 10^3} = 74.515 \end{aligned}$$

Густина потоку пульсара (~ 0.6 Ян у центрі діапазону 30–70 МГц) взята з табл. 2 [127]).

Розрахуємо таку ж величину для секції радіотелескопа УТР-2 з ефективною площею $\sim 12\,000$ м², для густини потоку 0.3 Ян у центрі частотного діапазону 16,5–33 МГц:

$$SNR = \frac{\Delta S \cdot A_e \sqrt{\Delta t \cdot \Delta f \cdot (\tau_p / P)}}{l \cdot k_B \cdot T_{bg}} =$$

$$= \frac{0.3 \cdot 10^{-26} \cdot 10 \cdot 12 \cdot 10^3 \sqrt{15 \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 0.1}}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 20 \cdot 10^3} = 100.986.$$

Тобто чутливість субрешіток ГУРТ та секцій УТР-2 до радіовипромінювання пульсара, який має достатньо малий спектральний індекс, доволі близькі, при тому, що їх геометричні площі помітно відрізняються.

Варто також прийняти до уваги ще дві обставини. Усереднений профіль імпульсу пульсарів, як правило, розширюється з пониженням частоти [133]. За результатами [127], [134] таке розширення може становити 1.5 – 2 рази у діапазоні 20 – 50 МГц. Приблизно на стільки ж зростає піковий потік випромінювання пульсара на частотах 30 – 70 МГц, оскільки у розрахунках відношення С/Ш фігурує середня густина потоку пульсара за період. Також важливу роль відіграє вплив завад у діапазоні частот УТР-2, особливо на частотах нижче 20 МГц. Завади від наземних радіостанцій на декілька порядків перевищують рівень шуму галактичного фону, і, відповідно, повністю маскують випромінювання космічного джерела. Частотні канали, що вражені завадами, виключаються з аналізу, що призводить до зменшення відношення С/Ш усереднених імпульсів, отриманих на УТР-2 через зменшення ефективної смуги частот накопичення сигналу.

Нестабільність іоносфери також відіграє свою негативну роль у поширенні сигналу від позаземного джерела. Напрямок надходження хвилі від нього, через рефракцію на іоносфері, може час від часу виходити за межі головного променя антени УТР-2 [102], який є досить вузьким ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$). Це також може призводити до зменшення відношення С/Ш при довготривалому накопиченні сигналу.

Короткий аналіз чутливості двох інструментів, що можуть бути використані для спостереження пульсарів, УТР-2 та субрешітки ГУРТ у відповідних діапазонах хвиль, показує, що вони з урахуванням діючих на них

факторів не сильно різняться між собою. Це дає можливість використовувати обидва ці інструменти для одночасного спостереження пульсарів.

4.2 Детектування радіовипромінювання пульсарів з використанням субрешітки ГУРТ

Першим етапом дослідження пульсарів на новому інструменті було проведення їх огляду з використанням субрешітки ГУРТ. В перелік кандидатів обрано пульсари, які були виявлені у декаметровому діапазоні за допомогою радіотелескопа УТР-2 [127]. Огляд включає детектування профілю усередненого імпульсу у діапазоні 30 – 70 МГц, визначення міри дисперсії, потоку, а також, відношення С/Ш, якого можна досягти при їх спостереженнях. Для аналізу даних спостережень, отриманих за допомогою приймача ADR, було адаптовано програмне забезпечення, яке раніше застосовувалося для даних, отриманих на приймачах DSPZ радіотелескопа УТР-2. Його функції включають очищення даних від завад, усереднення імпульсів та компенсацію дисперсійної затримки імпульсу у частотних каналах діапазону частот спостережень.

Для детектування було обрано смугу частот 30–70 МГц, адже субрешітка ГУРТ за оцінками має максимальну чутливість до радіовипромінювання пульсарів саме у цій смузі. Дані спостережень записувалися у спектральному режимі з часовою роздільною здатністю 9,830 мс. Час одного спостереження, і, відповідно, накопичення усередненого імпульсу був від 2 до 4 годин. При детектуванні сигналу пульсарів, завдяки їхній специфічній формі імпульсів, окрім загальноприйнятих критеріїв детектування, таких як просторовий (напрямок з якого приходить сигнал), амплітудний (значення потоку в імпульсі) та часовий (тривалість імпульсів), можна застосовувати додаткові критерії детектування, зокрема дисперсійну затримку та період повторення імпульсів. Якщо отриманий усереднений

імпульс відповідає додатковим критеріям, то для впевненої реєстрації усередненого імпульсу достатньо відношення С/Ш менше 10. Ми приймаємо достатнє відношення $C/\Pi \geq 4$.

Перелік пульсарів, вибраних для спостережень, включав у себе переважно ті, що знаходяться найближче до Землі. Окрім очевидного критерію величини потоку пульсара, для спостереження важливо, щоб характерний час розсіювання був менший за період пульсара, інакше передній фронт нового імпульсу буде поглинутий розсіяним сигналом попереднього імпульсу. Зафіксувати імпульсне випромінювання в разі, коли час розсіювання перевищує період, стає важче, а іноді і зовсім неможливо. Час розсіювання однозначно пов'язаний з кількістю речовини та її неоднорідностями на шляху поширення сигналу, а кількість речовини пов'язана з відстанню до пульсара та її концентрацією у міжзоряному просторі. Період імпульсів, що випромінюються пульсарами, лежить у межах від мілісекунд до десятків секунд. На даний час пульсаром з найбільшим періодом повторення імпульсів вважається пульсар J0250+5854, період якого складає 23.5 с [135].

За 2016 – 2018 роки було проведено декілька сесій спостережень пульсарів за допомогою субрешітки ГУРТ. У табл. 4.1 наведено перелік пульсарів, які на ній досліджувалися, загальна кількість сеансів спостережень та кількість успішних детектувань. Всього було проведено приблизно 150 сеансів спостережень з метою детектування 36 пульсарів. Для цього було використано 450 годин спостережного часу із середнім часом усереднення у 3 години на пульсар. Для обробки результатів спостережень на сервері Радіоастрономічної обсерваторії ім. С. Я. Брауде та кластері РІ НАНУ було витрачено приблизно 1350 годин машинного часу, тобто 3 години обчислень на 1 годину спостережень.

Таблиця 4.1 – Перелік пульсарів для яких було проведені спостереження на субрешітці ГУРТ.

| № | Назва пульсара | Детектовано на УТР-2 | Детектовано на ГУРТ | Кількість сеансів спостережень на ГУРТ | Кількість вдалих сеансів ($SNR \geq 4$) |
|----|----------------|----------------------|---------------------|--|---|
| 1 | B0031-07 | + | + | 5 | 4 |
| 2 | B0114+58 | — | — | 2 | 0 |
| 3 | B0138+59 | — | — | 4 | 0 |
| 4 | B0148-06 | + | — | 2 | 0 |
| 5 | B0301+19 | — | — | 2 | 0 |
| 6 | B0320+39 | + | + | 4 | 1 |
| 7 | B0329+54 | + | + | 3 | 2 |
| 8 | B0355+54 | — | — | 3 | 0 |
| 9 | B0450+55 | + | — | 2 | 0 |
| 10 | B0525+21 | — | — | 3 | 0 |
| 11 | B0531+21 | — | — | 3 | 0 |
| 12 | B0609+37 | — | — | 4 | 0 |
| 13 | B0809+74 | + | + | >10 | >10 |
| 14 | B0820+02 | — | — | 2 | 0 |
| 15 | B0823+26 | + | + | 1 | 1 |
| 16 | B0834+06 | + | + | >10 | >10 |
| 17 | B0919+06 | + | + | 2 | 1 |
| 18 | B0943+10 | + | + | 2 | 2 |
| 19 | B0950+08 | + | + | 6 | 6 |
| 20 | B1112+50 | + | — | 3 | 0 |
| 21 | B1133+16 | + | + | >10 | >10 |
| 22 | B1237+25 | + | + | 3 | 2 (обидва C/Ш = 4) |
| 23 | B1508+55 | + | + | >10 | |
| 24 | B1530+27 | + | — | 1 | |
| 25 | B1540-06 | + | — | 1 | |
| 26 | B1604-00 | + | — | 1 | 0 |
| 27 | B1642-03 | — | — | 3 | 0 |
| 28 | B1822-09 | + | + | 3 | 1 |
| 29 | B1919+21 | + | + | >10 | >10 |
| 30 | B1929+10 | + | — | 3 | 0 |
| 31 | B2016+28 | + | + | 2 | 1 |
| 32 | B2020+28 | — | — | 1 | 0 |
| 33 | B2110+27 | + | — | 4 | 0 |
| 34 | B2217+47 | — | + | 1 | 1 |
| 35 | J0243+5267 | — | — | 1 | 0 |
| 36 | J0459-0210 | — | — | 1 | 0 |

За результатами проведених спостережень та обробки даних було детектовано 16 пульсарів [28], [136]. Результати обробки даних, отриманих для інших 20 пульсарів, не дали можливість виявити профілі усереднених імпульсів на фоні шумів. Окрім тих пульсарів, які були детектовані за

допомогою радіотелескопа УТР-2, в нашому огляді було зроблено спробу виявлення пульсара B2217+47. Цей пульсар має значення $DM = 43.5 \text{ см}^3$, а тому не входив в огляд пульсарів на УТР-2. Пульсар було впевнено виявлено і отримано усереднений профіль імпульсу з відношенням $S/\Pi = 13$.

Детектовані пульсари та їх визначені характеристики (міра дисперсії, співвідношення S/Π профілю усередненого імпульсу, період та густина потоку) наведено у табл. 4.2. Для порівняння в останньому стовпці таблиці наведені значення густини потоків пульсарів, що отримані іншими дослідниками на інших інструментах у близьких діапазонах частот.

Таблиця 4.2 – Параметри пульсарів, детектованих за допомогою субрешітки ГУРТ.

| № | Назва пульсара | DM , пк/см ³ | S/Π , рази | Період, с | Густина потоку, мЯн | |
|----|----------------|------------------------------|-------------------|--------------|---------------------|---|
| | | | | | Субрешітка ГУРТ | Інші інструменти з робіт Stovall [31] / Ізвскова [137]* |
| 1 | B0031-07 | 10.896 | 6 | 0.943 | 320 (160) | 6370 (3190) |
| 2 | B0320+39 | 26.082 | 5 | 3.032 | 300 (150) | 220 (110) 230* (120)* [61 МГц] |
| 3 | B0329+54 | 26.780 | 24 | 0.714 | 1190 (600) | 4160 (2080) |
| 4 | B0809+74 | 5.752 | 22 | 1.292 | 1280 (640) | 1870* (350)* [61 МГц] |
| 5 | B0823+26 | 19.475 | 14 | 0.531 | 350 (180) | 450 (230) |
| 6 | B0834+06 | 12.858 | 44 | 1.274 | 1550 (780) | 4680 (2340) |
| 7 | B0919+06 | 27.325 | 5 | 0.431 | 810 (410) | 770* (160)* [85 МГц] |
| 8 | B0943+10 | 15.330 | 17 | 1.098 | 470 (240) | 1290* (350)* [61 МГц] |
| 9 | B0950+08 | 2.970 | 36 | 0.253 | 1470 (740) | 2330* (620)* [102.5 МГц] |
| 10 | B1133+16 | 4.487 | 15 | 1.188 | 6000 (3000) | 4710 (2360) |
| 11 | B1237+25 | 9.260 | 4 | 1.382 | 170 (90) | 510 (250) |
| 12 | B1508+55 | 19.623 | 15 | 0.740 | 2000 (1000) | 2130 (1060) |
| 13 | B1822-09 | 19.408 | 5 | 0.769 | 3100 (1550) | 2220 (1110) |
| 14 | B1919+21 | 12.431 | 42 | | 3000 (1500) | 2100* (430)* [61 МГц] |
| 15 | B2016+28 | 14.176 | 5 | 0.558 | 270 (140) | 590 (290) |
| 16 | B2217+47 | 43.548 | 13 | 0.538 | 750 (380) | 10100 (5050) |

Аналізуючи дані таблиці, можна побачити, що отримані нами значення потоків пульсарів в межах похибок збігаються за порядком величини з

оцінками інших дослідників, які отримані у роботі [31] на частоті 49,5 МГц, та роботі [137], наведені значення з якої позначені зірочкою, а середня частота спостережень наведена у квадратних дужках. Не збігаються з даними інших авторів тільки потоки пульсарів B0031-07 та B2217+47. Визначити причину цих розходжень допоможуть подальші спостереження. В табл. 4.2 похибки визначення потоків наведені у круглих дужках. Похибки вимірювань потоків за допомогою субрешітки ГУРТ оцінюються нами у 50 % від отриманого значення, враховуючи похибки визначення яскравісної температури фону (30%) [107] та похибки визначення параметрів радіотелескопа з урахуванням впливу землі не більше 10 – 15 % [138].

Треба зазначити, що у таблиці наведені найвищі значення відношення С/Ш для кожного пульсара за серію спостережень в межах даного огляду. Накопичення усередненого імпульсу кожного пульсара проводилися від 2 до 4 годин, а час спостережень вибирався поблизу верхньої кульмінації джерела. Відношення С/Ш для кожного пульсара у різні дні сесії спостережень змінювався доволі суттєво, а в деяких випадках пульсар взагалі не вдалось детектувати. Для всіх пульсарів визначено міру дисперсії, однак тільки для пульсарів з високим співвідношенням С/Ш (більше 10) можна говорити про надійне визначення цього параметра. Отримані дані показують, що принаймні для 7 – 10 пульсарів можна виконувати довготривалий моніторинг флуктуацій значення міри дисперсії, та, можливо, інших параметрів, використовуючи лише одну субрешітку ГУРТ.

Профілі усереднених імпульсів пульсарів, детектованих за допомогою субрешітки ГУРТ [136], наведені на рис. 4.1 – 4.3. Для кожного джерела показано профіль усередненого імпульсу, накопиченого у діапазоні частот 30 – 70 МГц (ліва верхня панель), профіль імпульсу у окремих смугах цього діапазону (ліва нижня панель), а також залежність профілю усередненого імпульсу, від значення міри дисперсії, що використовується для компенсації дисперсійної затримки (права панель).

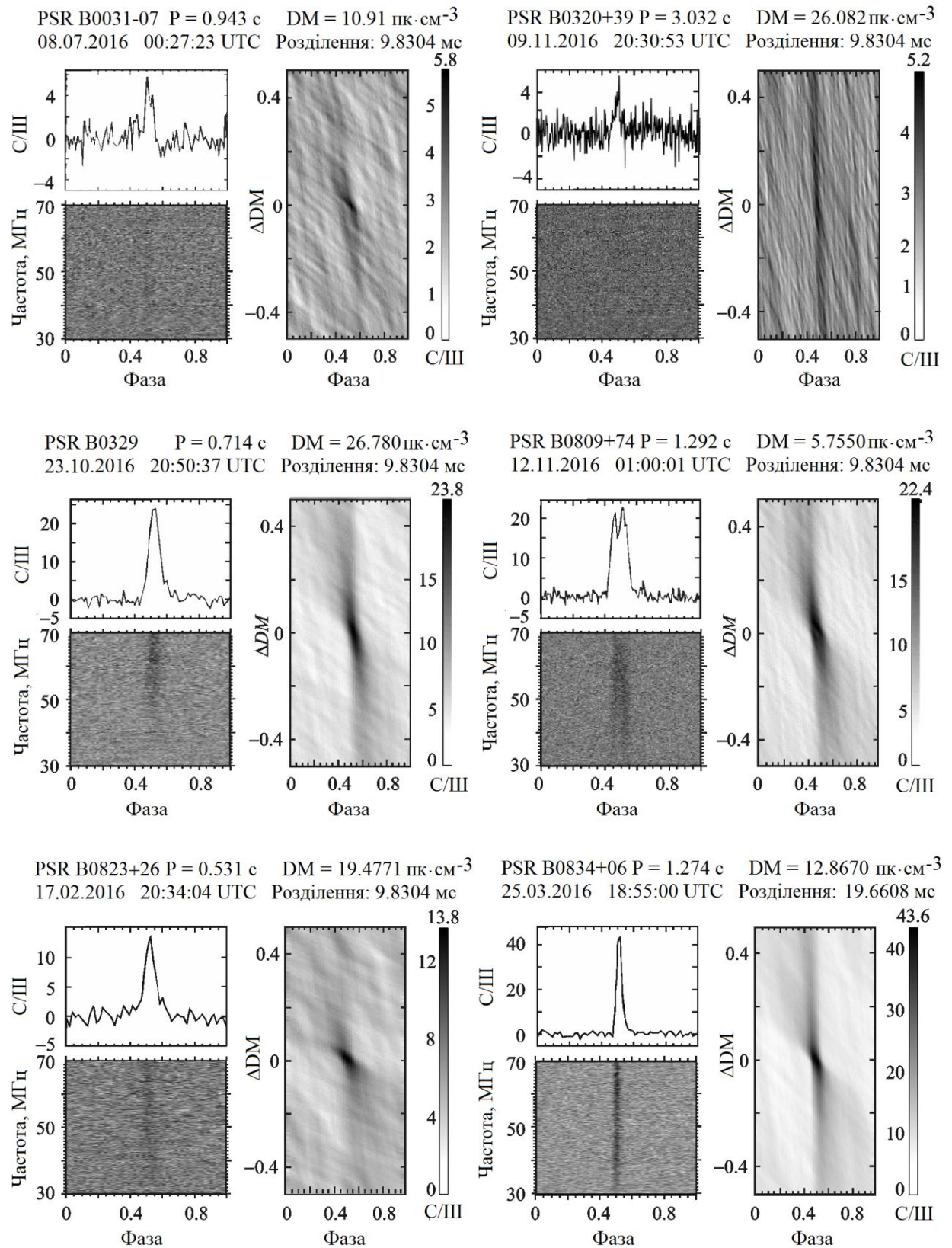


Рис. 4.1. Усереднені профілі імпульсів пульсарів B0031-07, B0320+39, B0329+54, B0809+74, B0823+26, B0834+06, детектованих за допомогою субрешітки ГУРТ.

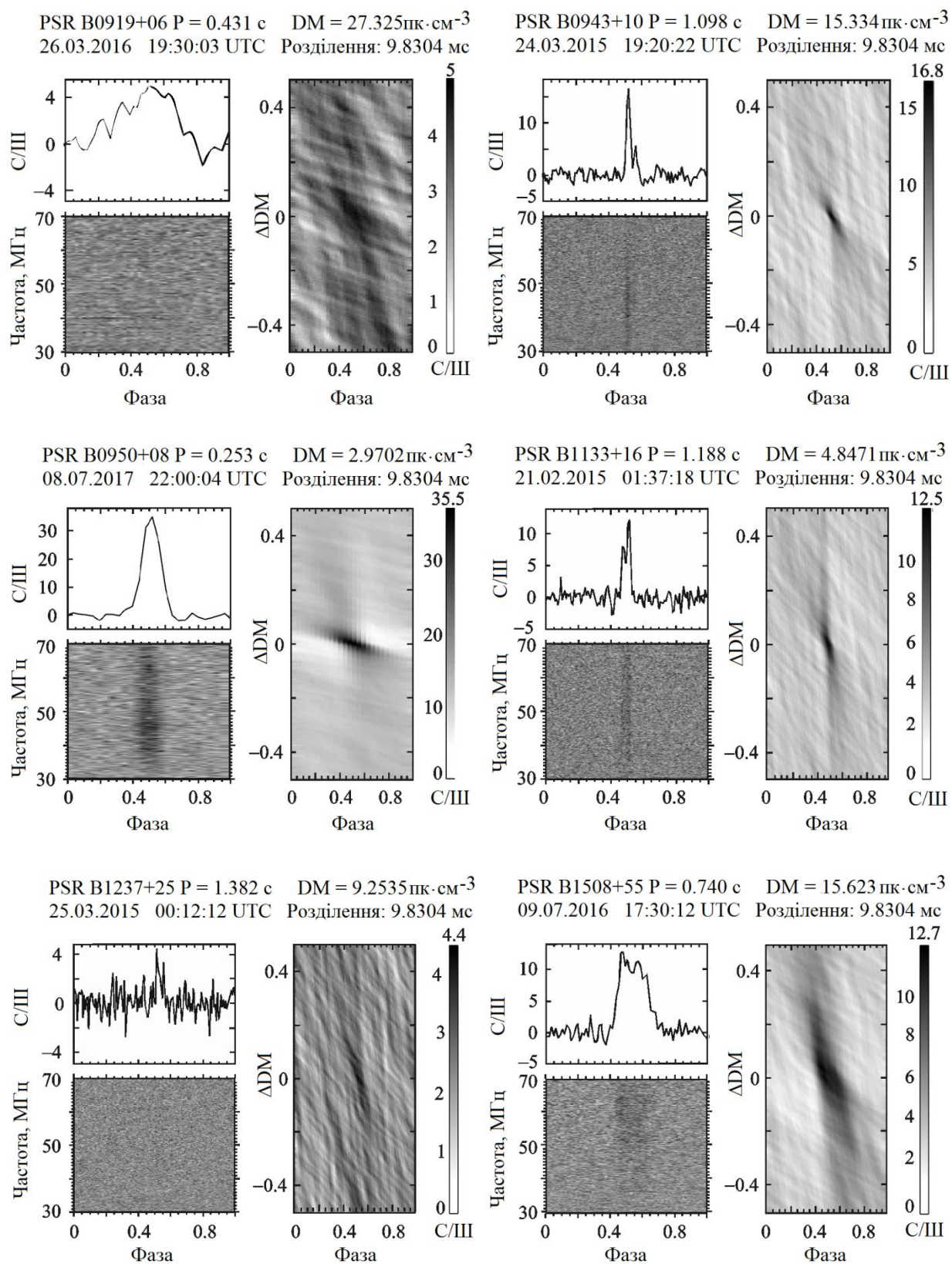


Рис. 4.2. Усереднені профілі імпульсів пульсарів B0919+06, B0943+10, B0950+08, B1133+16, B1237+25, B1508+55, детектованих за допомогою субрешітки ГУРТ.

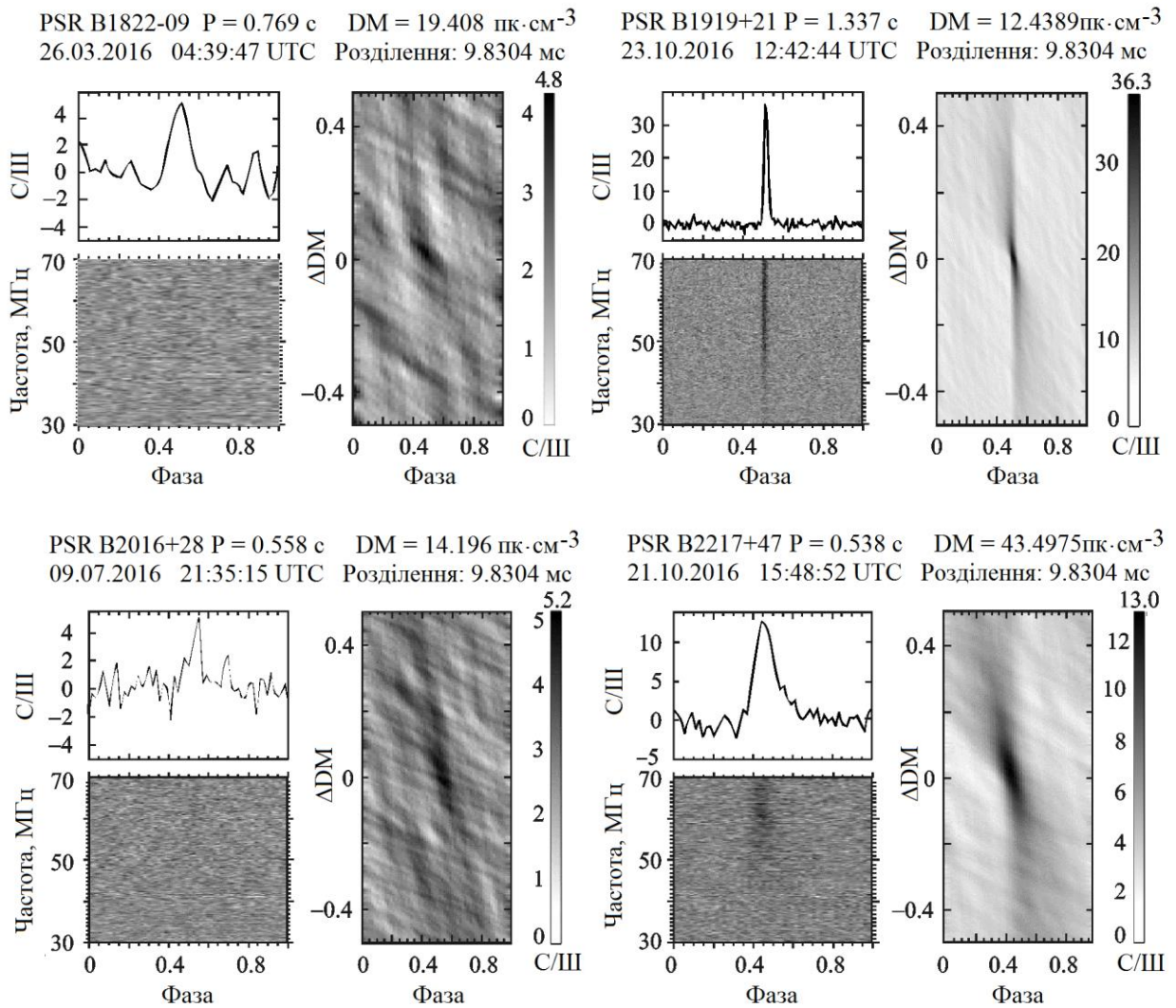


Рис. 4.3. Усереднені профілі імпульсів пульсарів B1822–09, B1919+21, B2016+28, B2217+47, детектованих за допомогою субрешітки ГУРТ.

Останній графік дає той самий додатковий критерій детектування джерела, що дає можливість відрізнити випадкові викиди шуму від імпульсу, який інтегрується у всьому частотному діапазоні з різною компенсуючою затримкою у частотних каналах. Профілі імпульсів, накопичених у окремих частотних смугах, дають можливість спостерігати зміну форми імпульсу з частотою.

Обробка даних спостережень пульсарів включає такі етапи. Великий масив даних у спектральній області в широкому діапазоні частот з великою часовою роздільною здатністю піддається процедурі очищення від тих завад [139], що перевищують загальний фоновий шум на 3σ за амплітудою.

Обчислюється період пульсара на епоху спостережень і отримується усереднений імпульс у кожному частотному каналі шляхом «розрізання» масиву даних на кадри довжиною у період пульсара та усереднення їх у часі. Після усереднення виконується пошук оптимальної міри дисперсії, який відбувається у такий спосіб. За прицільними значеннями міри дисперсії виконується компенсація дисперсійної затримки у кожному частотному каналі та проводиться додавання сигналів з усіх каналів, у результаті чого ми отримуємо профіль усередненого імпульсу. Оціночне значення міри дисперсії може бути неточним, оскільки є імовірність, що вона може дещо змінюватися з часом, тому на останньому етапі відбувається підбір оптимального її значення у діапазоні $\pm 0.5 \text{ пк} \times \text{см}^3$ з кроком $0.002 \text{ пк} \times \text{см}^3$, починаючи від прицільного значення з метою знайти максимальне відношення С/Ш на профілі усередненого імпульсу. Компенсація дисперсійної затримки, за суттю, є відновлення початкової форми імпульсу після впливу середовища поширення, який призводить до частотної залежності часу дисперсійної затримки. Таким чином, у результаті обробки маємо три графіки, показані на рис. 4.1 – 4.3 для кожного пульсара. Як основний результат нас тут цікавить максимальне відношення С/Ш усередненого у часі та по частоті імпульсу. Відношення С/Ш визначалося як відношення максимуму амплітуди імпульсу до величини середньоквадратичного відхилення відліків шуму поза межами імпульсу від їхнього середнього значення. Вважалося також, що у проміжку між імпульсами у розкритті антени потрапляє лише фонове випромінювання. З цього випливає, що відношення С/Ш і є перевищення потоку пульсара над яскравісною температурою фону. Тобто можна визначити потік радіовипромінювання пульсара за формулою (4.4), знаючи параметри усередненого імпульсу.

4.3 Одночасні спостереження пульсарів на різних радіотелескопах суміжних діапазонів

Визначимо можливості спільних одночасних спостережень пульсарів на радіотелескопах ГУРТ та УТР-2. Метою таких спостережень є широкосмугові вимірювання характеристик радіовипромінювання пульсарів і дослідження їх довготривалих змін. Використання двох радіотелескопів у даному випадку дає можливість значно розширити смугу частот спостережень (за рахунок широкої робочої смуги ГУРТ) та отримати велику чутливість на частотах 10 – 33 МГц (завдяки розмірам антенної решітки радіотелескопа УТР-2).

Для довготривалих спостережень пульсарів з табл. 4.2 були вибрані такі, які спостерігаються з найбільшим відношенням С/Ш. При плануванні спостережень бралось також до уваги, що для мінімізації впливу завад дослідження необхідно проводити в нічний час. Крім того, враховувалося, що радіотелескоп УТР-2 має максимальну чутливість при спостереженнях джерел лише у діапазоні $\pm 60^\circ$ від зеніту. Тому час спостереження вибирався так, щоб середина сеансу спостережень збігалася з часом верхньої кульмінації обраного джерела.

Враховуючи вищенаведені фактори, для досліджень було обрано три пульсари: В1133+16, В1508+55, В1919+21. Верхні кульмінації цих пульсарів відбуваються з інтервалом в 4 години, що ідеально підходить для спостереження кожного джерела поблизу кульмінації та переключення радіотелескопа на спостереження наступного пульсара. Кульмінації всіх трьох пульсарів навесні припадають на нічний час у місці розташування Радіоастрономічної обсерваторії ім. С. Я. Брауде. Ми обрали однакову тривалість спостереження кожного пульсара – 3 години 56 хвилин як компроміс між максимально необхідним часом усереднення і помірним часом спостережень і обробки даних, та як зручну для переключення радіотелескопа з одного джерела на інше. Бралось також до уваги, що для

досліджень спектральних характеристик та їх довготривалих варіацій бажано проводити спостереження кожного дня в один і той же час відносно кульмінації джерел, та записувати їх дані однакової тривалості від дня до дня.

У квітні та травні 2017 р. були проведені дві сесії спільних спостережень трьох перелічених пульсарів на радіотелескопах УТР-2 і субрешітці ГУРТ. Загалом серія спостережень включає 13 днів, але не для кожного дня є в наявності дані від всіх інструментів та конфігурацій антенних решіток через технічні проблеми та перетин часу спостережень з іншими дослідженнями на задіяних радіотелескопах. Перед початком спостережень була розроблена їх методика, а під час проведення досліджень ця методика була удосконалена [136].

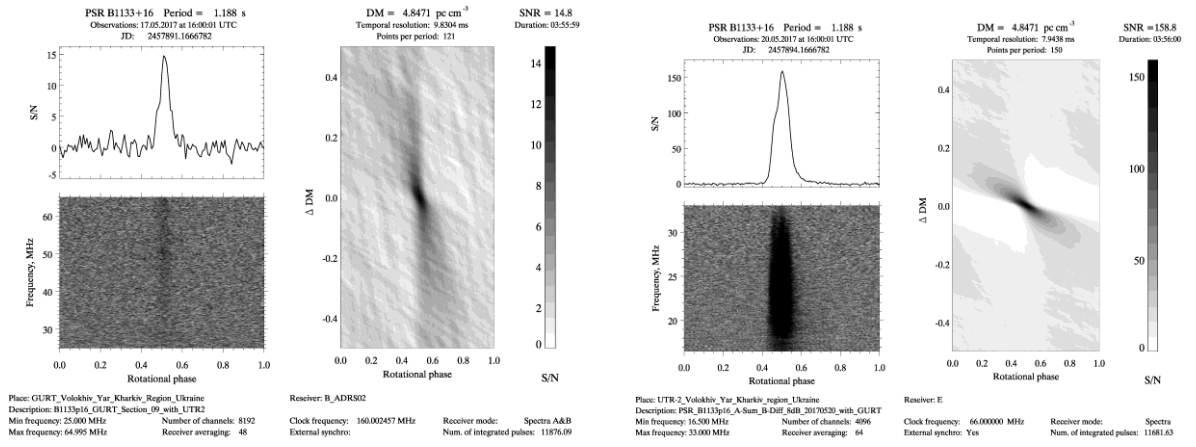
Для спостереження слабких сигналів важливо застосувати оптимальну конфігурацію антенної решітки радіотелескопа, для отримання максимальної чутливості і мінімізації часу обробки даних спостережень. УТР-2 має два плеча антенної решітки: Північ-Південь та Захід. Під час досліджень використовувався сума-різницевий пристрій, що дає можливість подавати на вхід приймача DSPZ одразу когерентну суму сигналів від обох плечей радіотелескопа. Так само на субрешітці ГУРТ використовувався сума-різницевий пристрій для підвищення чутливості шляхом отримання суми сигналів з решіток ортогональних поляризацій однієї субрешітки.

Параметри усереднення сигналів були обрані виходячи з наступних міркувань. Часова роздільна здатність дорівнювала 9.830 мс та 7.944 мс для ГУРТ та УТР-2, відповідно. Ці значення є типовими для оглядів пульсарів на цих телескопах і достатні для всіх трьох пульсарів, що мають період близько однієї секунди, а тривалість імпульсу не менше однієї десятої періоду. Таким чином, на період пульсара припадає близько ста відліків, а на сам імпульс – близько десяти, чого цілком достатньо для його детектування та аналізу. Для запису даних у спектральній області на ГУРТ була обрана максимальна роздільна здатність приймача ADR по частоті у 4.882 кГц. Такий вибір хоча і

призводить до збільшення обсягу записаних даних, але дає можливість зберігати максимум корисної інформації при очищенні даних від завад та точніше компенсувати дисперсійну затримку, що забезпечує максимально досяжне відношення С/Ш отриманого усередненого профілю імпульсу пульсара. Оскільки у приймачі DSPZ радіотелескопа УТР-2 не передбачена можливість регулювання його частотної роздільної здатності, було використане стандартне її значення у 4.028 кГц, цілком достатнє для розв'язання поставленої задачі.

У перший тиждень спостережень було виявлено, що тренди зміни потоків пульсарів, що отримані за допомогою двох інструментів, не завжди збігаються. Однією з причин такого ефекту могла бути нестабільна іоносфера, через рефракцію на якій напрямок надходження хвилі від джерела може виходити за межу вузького головного променя антени радіотелескопа. Для того, щоб контролювати можливість виникнення такої ситуації, було прийнято рішення використати гнучкість конфігурацій радіотелескопа УТР-2 і записувати сигнал прийнятий не тільки всім радіотелескопом, а і парою його окремих секцій. Для цього було зібрано схему, в якій сигнали секцій №1 (плече Північ – Південь) та №9 (плече Захід) розділялися за допомогою гібридних розгалужувачів у два тракти. Один сигнал подавався безпосередньо на окремий вхід приймача DSPZ, а інший використовувався для формування сумарного променя всього радіотелескопа.

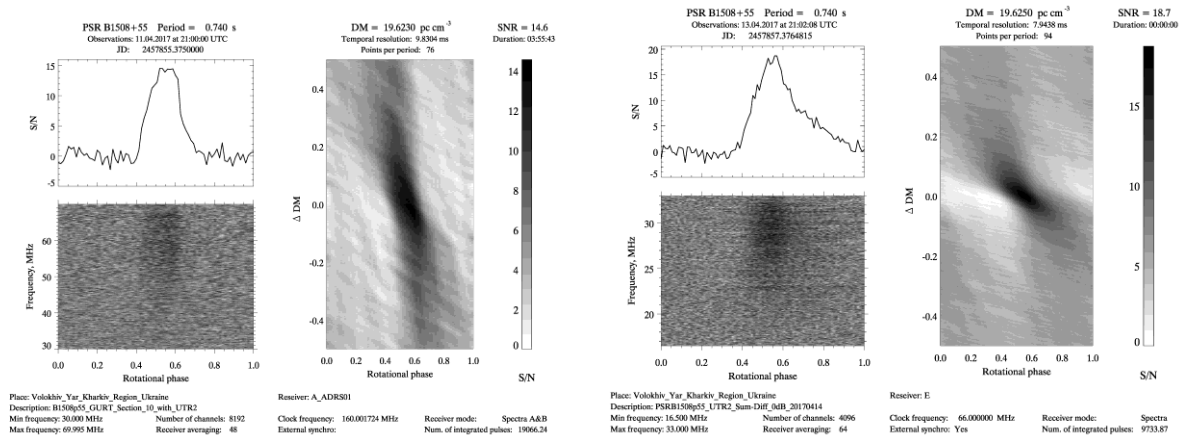
На рис. 4.4 – 4.6 наведено результати спільних спостережень трьох пульсарів: B1133+16, B1508+54 та B1919+21. На рисунках зображено ті ж параметри усереднених імпульсів, що і на рис. 4.1 – 4.3, але вибрано найкращі профілі по співвідношенню С/Ш з серії спільних спостережень [136].



a)

b)

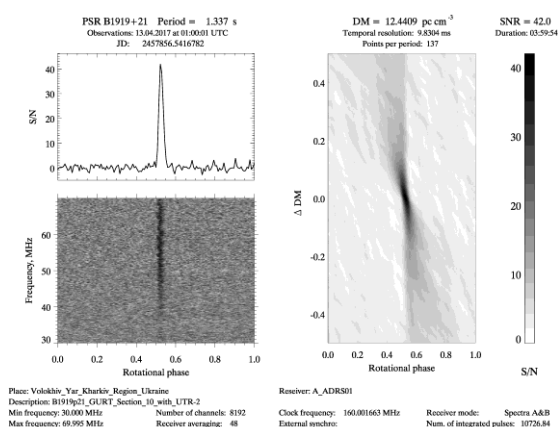
Рис. 4.4. Результати спостережень пульсара В 1133+16 на субрешітці ГУРТ (а) та на радіотелескопі УТР-2 у режимі додавання сигналів від плечей (результати близькі до середніх за сесію спостережень на даному телескопі).



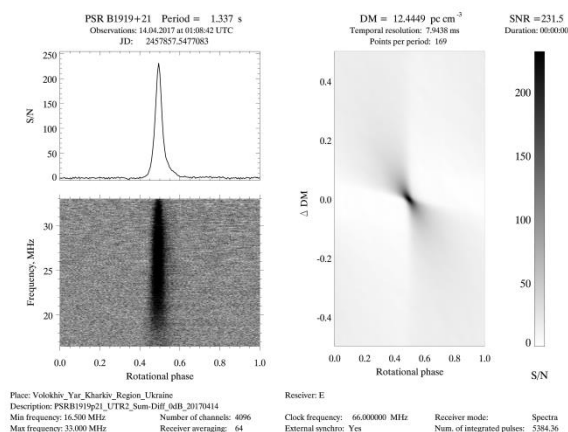
a)

b)

Рис. 4.5. Результати спостережень пульсара В 1508+55 на субрешітці ГУРТ (а) та на радіотелескопі УТР-2 у режимі додавання сигналів від плечей (результати близькі до середніх за сесію спостережень на даному телескопі).



a)



б)

Рис. 4.6. Результати спостережень пульсара В 1919+21 на субрешітці ГУРТ (а) та на радіотелескопі УТР-2 у режимі додавання сигналів від плечей (результати близькі до середніх за сесію спостережень на даному телескопі).

Оцінки потоків пульсарів для кожного дня спостережень з сесії наведено на рис. 4.7 – 4.9, які базуються на даних яскравісної температури галактичного фонового випромінювання у напрямку пульсарів. Добре видно, що ці оцінки змінюються день від дня, особливо це помітно на серії даних спостережень пульсара В1919+21. Це перший пульсар, який був відкритий на частоті 81.5 МГц у 1967 році, і вже у першій статті [119] згадувалася велика змінність видимого потоку випромінювання на різних часових масштабах. Точні причини змінності потоків пульсарів на низьких частотах досі не визначені.

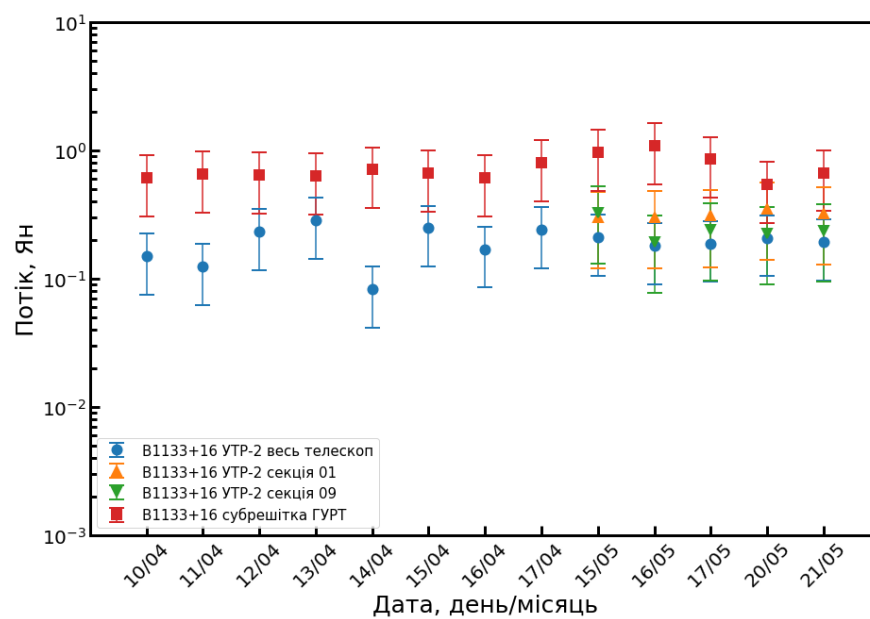


Рис. 4.7. Оцінки потоків пульсара В1133+16 кожного дня серії спільних спостережень.

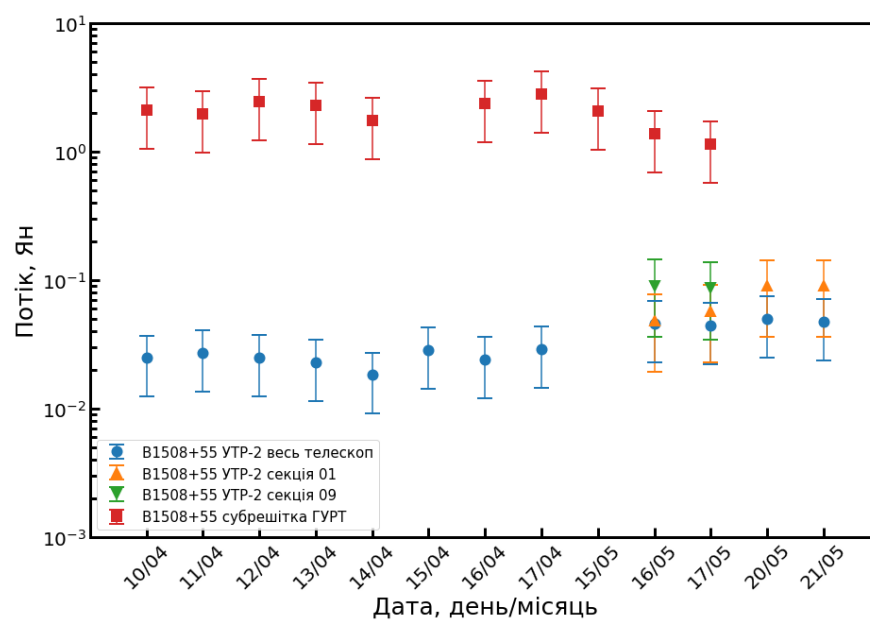


Рис. 4.8 Оцінки потоків пульсара В1508+55 кожного дня серії спільних спостережень.

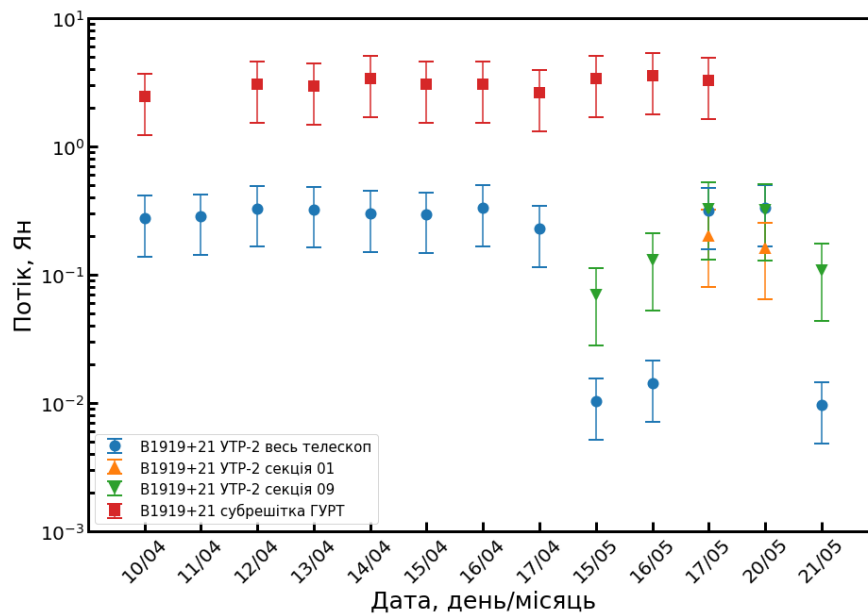


Рис. 4.9. Оцінки потоків пульсара В 1919+21 кожного дня серії спільних спостережень.

Загалом видно, що оцінки потоків, що отримані за допомогою субрешітки ГУРТ, є стабільнішими за ті, що виміряні радіотелескопом УТР-2 та його окремими секціями. Тренди зміни оцінок потоків на повному радіотелескопі УТР-2 та його секціях співпадають між собою або помітно корелюють. З цього факту можна зробити припущення, що видимі потоки сильно змінюються тільки на найнижчих частотах, і причиною цих змін може бути іоносфера Землі. Відмінність потоків, визначених за допомогою радіотелескопа УТР-2 та його окремих секцій у дні, коли потоки сильно відрізняються від середніх значень (наприклад для пульсарау В1919+21), можна пояснити внеском іоносферної рефракції у зміну напряму поширення випромінювання. Через рефракцію сигнал не потрапляє у вузький промінь повного радіотелескопа, але потрапляє у широкий промінь секцій № 1 та № 9. Однак, отриманий ряд результатів спостережень є малим для надійних статистичних висновків та потребує доповнення результатами подальших довгострокових спостережень.

З профілів усереднених імпульсів, наведених на рис. 4.5, добре видно, що для пульсара В1508+55 отримане значення відношення С/Ш на обох

радіотелескопах приблизно однакове, незважаючи на те, що ефективні площі цих інструментів різняться між собою у 200 разів. Це свідчить про те, що значення спектрального індексу цього пульсара може бути значно більшим ніж 1.84 [140], та наближається до величини 4.54, яка була отримана при вимірюваннях у декаметровому діапазоні на частотах 20 та 25 МГц за допомогою радіотелескопа УТР-2 [127]. Точніше визначити спектральний індекс можна шляхом подальших вимірювань у декаметровому і метровому діапазонах хвиль.

Додатково було проведено аналіз даних для визначення величини міри дисперсії кожного пульсара. Дані з повного радіотелескопа УТР-2 у адитивному режимі у наших спостереженнях мають найбільше співвідношення С/Ш, тому вони були використані для аналізу величини міри дисперсії. На рис. 4.10 – 4.12 показано варіації міри дисперсії трьох пульсарів для яких проводився довгостроковий моніторинг. На рисунках використано однаковий масштаб по вертикальній осі для зручного співставлення похибок визначення величини міри дисперсії.

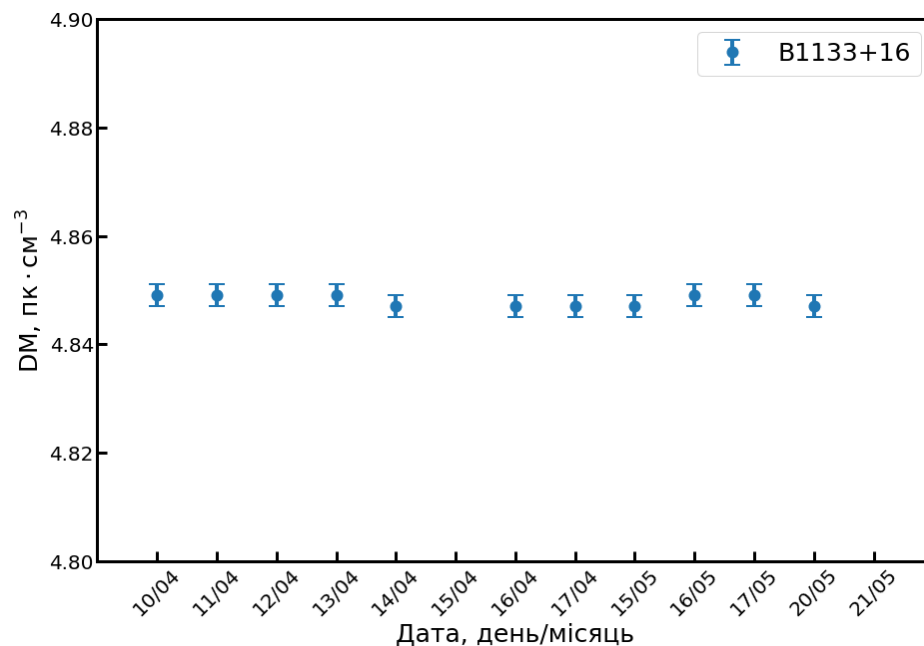


Рис. 4.10. Варіації величини міри дисперсії пульсара B1133+16 від дня проведення спостережень.

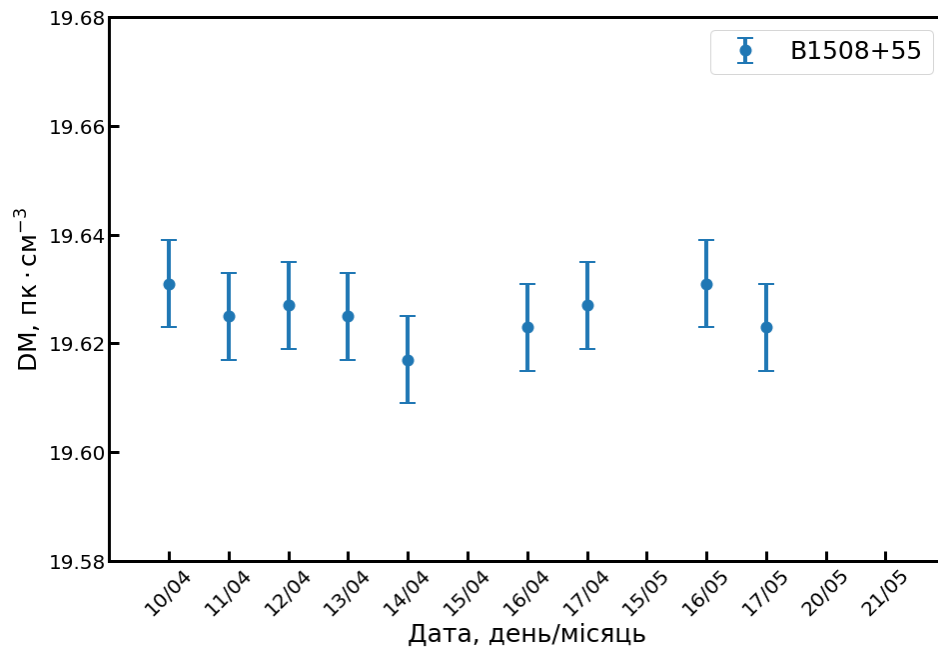


Рис. 4.11. Варіації величини міри дисперсії пульсара B1508+55 від дня проведення спостережень.

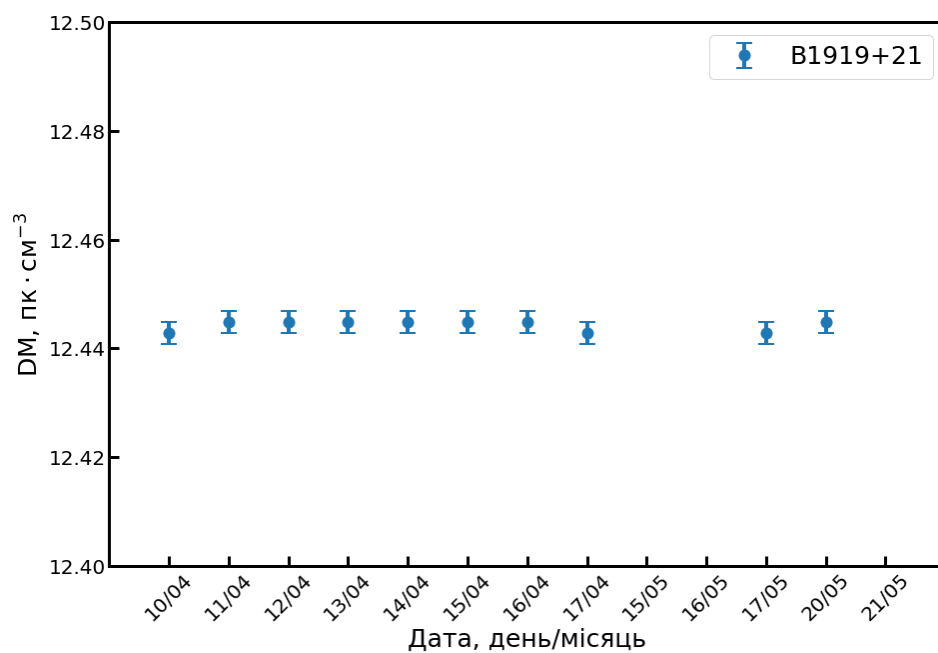


Рис. 4.12. Варіації величини міри дисперсії пульсара B1919+21 від дня проведення спостережень.

Використана методика аналізу даних спостережень і, зокрема, автоматичного визначення величини міри дисперсії аналогічна до методики,

викладеної у статті [127] для досліджень на радіотелескопі УТР-2, тому логічно застосувати такі ж оцінки похибок. У роботі [127] похибка оцінки величини міри дисперсії визначається з умови зменшення на 5 % максимуму усередненого у часі і частототному діапазоні імпульса при зміні величини міри дисперсії від оптимальної. Крок автоматичного визначення міри дисперсії у нашому випадку становить 0.002 пк/см^3 . Для пульсарів В1133+16 та В1919+21 така похибка становить два кроки (0.004 пк/см^3). Цікаво, що для пульсара В1508+55 похибка визначення величини міри дисперсії для даних радіотелескопа УТР-2 та субрешітки ГУРТ однакова (через однакове співвідношення С/Ш) та становить чотири кроки автоматичного визначення (0.008 пк/см^3). Зміни визначеної величини міри дисперсії протягом сесії спостережень для всіх трьох пульсарів не виходять за інтервал похибок, таким чином, варіацій величини міри дисперсії за сесію спостережень виявлено не було.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі наведені результати спостережень пульсарів у метровому діапазоні з метою виявлення можливостей детектування імпульсного радіовипромінювання за допомогою радіотелескопа малої ефективної площі – субрешітки ГУРТ. З 40 найближчих пульсарів, які вдалося дослідити за допомогою найбільшого декаметрового радіотелескопа УТР-2, на субрешітці ГУРТ вдалося впевнено детектувати 16 пульсарів. Розроблено методику спільних спостережень і програми обробки даних спостережень пульсарів одночасно на двох близько розташованих радіотелескопах УТР-2 та ГУРТ з метою дослідження довгострокових змін їх спектральних та часових характеристик у надширокій смузі частот 16–70 МГц. Представлено та проаналізовано результати спостережень, що були проведені за допомогою розробленої методики. Отримано додаткове підтвердження заниженої оцінки спектрального індексу пульсара B1508+55 у роботах інших авторів, вимірювання потоків для яких проводилися на більш високих частотах. Через невелику тривалість спостережень, отриманих даних недостатньо для докладного статистичного аналізу варіацій параметрів пульсарів, але отримані результати добре демонструють можливості подібних довгострокових спостережень.

Основні положення та результати цього розділу викладені в публікаціях автора [6], [24], [28], [134], [136].

ВИСНОВКИ

У результаті проведених в дисертаційній роботі досліджень була досягнута її мета: експериментально доведена можливість застосування субрешітки ГУРТ як малорозмірного НЧ широкосмугового радіотелескопа нового покоління для різноманітних астрофізичних досліджень, які не потребують високої кутової роздільної здатності інструменту. Для цього було створено і верифіковано її математичну модель, в результаті моделювання отримано та детально проаналізовано параметри, зокрема її чутливість. На основі отриманих даних оцінено можливості і параметри спостережень різноманітних типів випромінювання джерел радіовипромінювання у Всесвіті. Проведено дослідження галактичного фонового випромінювання, спорадичного випромінювання Сонця й Юпітера, імпульсного випромінювання пульсарів.

Основні оригінальні результати роботи такі:

1. Вперше виявлено тонку частотно-часову структуру різних типів сплесків спорадичного радіовипромінювання Сонця й Юпітера завдяки унікальним характеристикам низькочастотного малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ – надширокій смузі частот (8–80 МГц), високому розділенню у часі (5...100 мс) та частоті (9 кГц). Зокрема доповнено статистику появи сонячних сплесків типу дрейфуюча пара з прямим та зворотнім частотним дрейфом та визначено часову видиму затримку гармонік сплеску U-типу.

2. Вперше одночасно на декаметрових і метрових хвилях зареєстровано імпульсне радіовипромінювання 16 пульсарів, визначено їх густини потоків та з високою точністю (0.006 пк/см^3) виміряні їх міри дисперсії, що доводить унікальну можливість довготривалого моніторингу неоднорідностей міжзоряного середовища із використанням малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ і радіотелескопа УТР-2.

3. Доведено можливість проведення якісних астрофізичних досліджень за допомогою низькочастотних малорозмірних радіотелескопів нового

покоління шляхом визначення параметрів континуального, імпульсного, спорадичного, поляризованого космічного радіовипромінювання різноманітних об'єктів Всесвіту (Сонця, планет, міжпланетного і міжзоряного середовища, залишків наднових, пульсарів, радіогалактик, тощо).

4. Вперше детально досліджено параметри субрешітки низькочастотного радіотелескопа нового покоління ГУРТ, зокрема її чутливість, у надширокому діапазоні частот 8–80 МГц із використанням розробленої для неї коректної математичної моделі, яка на відміну від існуючих, бере до уваги всі джерела зовнішніх і внутрішніх шумів з урахуванням впливу ґрунту та взаємних зв'язків між елементами. Коректність моделі підтверджено відповідністю результатів моделювання та проведених натурних вимірювань. Їх результати доводять, що розроблена субрешітка забезпечує перевищення зовнішнього шуму над внутрішнім у 6–10 дБ для всіх її променів, що цілком задовольняє вимогам щодо її застосування для радіоастрономічних спостережень і астрофізичних досліджень.

Загалом отримані результати підтверджують великий потенціал використання сучасних малорозмірних широкосмугових НЧ радіотелескопів нового покоління для астрофізичних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. van Haarlem M. P. et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *Astron. Astrophys.* 2013. Is. 556. P. A2.
2. Dewdney P. E., Hall P. J., Schilizzi R. T., Lazio T. J. L. W. The Square Kilometre Array. *Proc. IEEE*. 2009. № 97. Is. 8. P. 1482–1496.
3. Ellingson S. W. et al. The LWA1 Radio Telescope. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013. № 61. Is. 5, P. 2540–2549.
4. Tingay S. J. et al. The Murchison Widefield Array: The Square Kilometre Array Precursor at Low Radio Frequencies». *Publ. Astron. Soc. Aust.* 2013. Vol. 30. P. e007.
5. Zarka P. et al. NenuFAR: Instrument description and science case. *Proc. of 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2015, P. 1–6.
6. Konovalenko A. et al. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. № 42, Is. 1. P. 11–48.
7. Patterson C. D. et al. Searching for Transient Pulses with the ETA Radio Telescope. *ACM Trans Reconfigurable Technol Syst.* 2009. № 1. Is. 4. P. 20:1–20:19.
8. Rosa G. S., Schuch N. J., Gomes N. R., Bergmann J. R., Echer E., Machado R. Inexpensive Interferometer for Low Frequency Radio Astronomy. *J. Commun. Inf. Syst.* 2012. № 27. Is. 1.
9. Alhameed A. et al. Building a decametric radio telescope array. *J. Instrum.* 2019. № 14. Is. 08, P. P08022.
10. «Interactive LOFAR Map». [Online]. URL: <https://www.astron.nl/lofartools/lofarmap.html>. (Дата звернення: 22.11.2019).
11. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. John Wiley & Sons. 2007.

12. Nijboer R. J., Pandey-Pommier M., de Bruyn A. G. LOFAR imaging capabilities and system sensitivity. ArXiv13084267 Astro-Ph. 2013.
13. Wijnholds S. J. van Cappellen W. A. In Situ Antenna Performance Evaluation of the LOFAR Phased Array Radio Telescope. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011. № 59, Is. 6. P. 1981–1989.
14. Bolli P., Pupillo G., Paonessa F., Virone G., Wijnholds S. J., Lingua A. M. Near-Field Experimental Verification of the EM Models for the LOFAR Radio Telescope. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2018. № 17. Is. 4. P. 613–616.
15. Virone G. et al. Strong Mutual Coupling Effects on LOFAR: Modeling and In Situ Validation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018. № 66, Is. 5. P. 2581–2588.
16. Błaszczewicz L. P. et al. PL612 LOFAR station sensitivity measurements in the context of its application for pulsar observations. *Adv. Space Res.* 2018. № 62. Is. 7. P. 1904–1917.
17. Ellingson S. W., Craig J., Dowell J., Taylor G. B., Helmboldt J. F. Design and commissioning of the LWA1 radio telescope. *Proc. of 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology.* 2013. P. 776–783.
18. Taylor G. B. et al. First light for the first station of the long wavelength array. *J. Astron. Instrum.* 2012. № 01. Is. 01. P. 1250004.
19. P. Zarka et al. LSS/NenuFAR: The LOFAR Super Stations Project in Nancay. *Proc. of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics SF2A-2012*, eds. Boissier S. et al. 2012.
20. Girard J. N., Zarka P., Tagger M., Denis L., Charrier D., Konovalenko A. Antenna design and distribution for a LOFAR Super Station in Nançay. *Proc. of 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium.* 2011. P. 1–4.
21. «Astronomers Page», NenuFAR. [Online] URL: <https://nenufar.obs-nancay.fr/en/astronomer/>. (Дата звернення: 22.11.2019).
22. Zarka P. et al. The Low-Frequency Radiotelescope NenuFAR. *Proc. of 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC).* 2018, P. 1–1.

23. Sutinjo A. T. et al. Characterization of a Low-Frequency Radio Astronomy Prototype Array in Western Australia. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2015. № 63. Is. 12. P. 5433–5442.

24. Коноваленко А. А. и др. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21. №. 2. С. 83.

25. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Gridin A. A., Tokarsky P. L., Yerin S. N. UWB active antenna array for low frequency radio astronomy. *Proc. of 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*. 2012. P. 39–43.

26. Yerin S. N., Gridin A. A., Tokarsky P. L. Phase shifter for antenna array of decameter range radio telescope. *Proc. of 19th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*. 2012. №. 2, P. 715–717.

27. Ерин С. Н. и др. Диаграммообразующий модуль для секции антенной решетки радиотелескопа ГУРТ декаметрового и метрового диапазонов волн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19, № 3, С. 240–248.

28. Zakharenko V. et al. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. № 05. Is. 04. P. 1641010.

29. Васильев А. Ю., Кузин А. И., Кравцов А. А., Булах Е. В., Виноградов В. В., Ваврив Д. М. Многофункциональный цифровой приемник-спектрометр. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19. № 3. С. 276.

30. Yerin S. N., Khristenko A. D., Gridin A. A., Reznik A. P., Kvasov G. V. Signal delivery system in a subarray of Giant Ukrainian Radio Telescope. *Proc. of 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2015, P. 1–3.

31. Stovall K. et al. Pulsar observations using the first station of the Long Wavelength Array and the LWA pulsar data archive. *Astrophys. J.* 2015. № 808, Is. 2. P. 156.
32. Tsai J.-W. et al. Observations of Giant Pulses from Pulsar B0950+08 Using LWA1. *Astron. J.* 2015. № 149, Is. 2. P. 65.
33. Bansal K., Taylor G. B., Stovall K., Dowell J. Scattering Study of Pulsars below 100 MHz Using LWA1. *Astrophys. J.* 2019. № 875. Is. 2. P. 146.
34. Taylor G. B. et al. Observations of Rotating Radio Transients with the First Station of the Long Wavelength Array. *Astrophys. J.* 2016. № 831. Is. 2. P. 140–147.
35. Obenberger K. S. et al. Limits on gamma-ray burst prompt radio emission using the LWA1. *Astrophys. J.* 2014. № 785. Is. 1. P. 27.
36. Helmboldt J. F. et al. All-sky imaging of meteor trails at 55.25 MHz with the first station of the Long Wavelength Array. *Radio Sci.* 2014. № 49. Is. 3. P. 157–180.
37. Imai M. et al. The Beaming Structures of Jupiter's Decametric Common S-bursts observed from the LWA1, NDA, and URAN2 Radio Telescopes. *Astrophys. J.* 2016. № 826. Is. 2. P. 176.
38. Tun Beltran S. D., Cutchin S., White S. A New Look at Type-III Bursts and Their Use as Coronal Diagnostics. *Sol. Phys.* 2015. № 290. Is. 9. P. 2423–2437.
39. Serylak M., Karastergiou A., Williams C., Armour W., Giles M., the L. P. W. Group. Observations of transients and pulsars with LOFAR international stations and the ARTEMIS backend. *Proc. Int. Astron. Union.* 2015. № 8. Is. S291. P. 492–494.
40. Błaszkievicz L., Lewandowski W., Krankowski A., Kijak J., Koralewska O., Dąbrowski B. P. Prospects for Scrutiny of Pulsars with Polish Part of LOFAR. *Acta Geophys.* 2016. № 64. Is. 1. P. 293–315.

41. Błaszkiwicz L., Lewandowski W., Krankowski A., Kijak J., Dąbrowski B. P. Pipeline for Pulsar Observations with PL612 LOFAR Station. *38 Pol. Astron. Soc. Meet.* 2018. № 7. P. 65.
42. Dąbrowski B. P., Krankowski A., Błaszkiwicz L., Rothkaehl H. Prospects for Solar and Space Weather Research with Polish Part of the LOFAR Telescope. *Acta Geophys.* 2016. № 64. Is. 3. P. 825–840.
43. Krankowski A., Błaszkiwicz L., Otmianowska-Mazur K., Soida M., Rothkaehl H., Atamaniuk B. POLFAR – Polish incarnation of the LOFAR. Scientific objectives and system realization. *Proc. of 2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*. 2014. P. 1–4.
44. Błaszkiwicz L. et al. Current observational activities of LOFAR Bałdy PL612 station. *Proc. Of 2018 Baltic URSI Symposium (URSI)*. 2018. P. 49–50.
45. Dąbrowski B. P. et al. Observations of the Sun using LOFAR Bałdy station. *Adv. Space Res.* 2018. № 62. Is. 7. P. 1895–1903.
46. Bernardi G. et al. A 189 MHz, 2400 sq. deg. Polarization Survey with the Murchinson Widefield Array 32-element Prototype. *Astrophys. J.* 2013. № 771. Is. 2. P. 105.
47. Bell M. E. et al. A survey for transients and variables with the Murchison Widefield Array 32-tile prototype at 154 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2014. № 438. Is. 1. P. 352–367.
48. Oberoi D. et al. First Spectroscopic Imaging Observations of the Sun at Low Radio Frequencies with the Murchinson Widefield Array Prototype. *Astrophys. J. Lett.* 2011. № 728. Is. 2. P. L27.
49. Horneffer A. et al. LOPES: detecting radio emission from cosmic ray air showers. *Gravitational Wave and Particle Astrophysics Detectors*. 2004. Is. 5500, P. 129–138.
50. Kraus J. D. Radio astronomy. New York. McGraw-Hill, 1966.

51. de Lera Acedo E. et al. SKA aperture array verification system: electromagnetic modeling and beam pattern measurements using a micro UAV. *Exp. Astron.* 2018. № 45. Is. 1. P. 1–20.
52. Ellingson S. W. Antennas for the next generation of low-frequency radio telescopes. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2005. № 53. Is. 8. P. 2480–2489.
53. Ellingson S. W., Simonetti J. H., Patterson C. D. Design and Evaluation of an Active Antenna for a 29–47 MHz Radio Telescope Array. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2007. № 55. Is. 3. P. 826–831.
54. Stewart K. P., Erickson W. C., Hicks B. C. Active balun/dipole development for the low frequency array. *Proc of 27th URSI GA.* 2002. Is. JBC.P.7. P. 1357.
55. Konovalenko A. A. et al. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2003. № 16. Is. 3. P. 149–164.
56. Ellingson S. W., Kramer T. C. Sensitivity and bandwidth of low-gain active antennas below 100 MHz. *Proc. of 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.* 2005. Is. 3A, P. 561–564.
57. Ellingson S. W. Sensitivity of Antenna Arrays for Long-Wavelength Radio Astronomy. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011. № 59. Is. 6. P. 1855–1863.
58. Falkovich I. S. et al. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* 2011. № 32. Is. 2. P. 127–145.
59. Hicks B. C. et al. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2012. № 124. Is. 920. P. 1090–1104.
60. Tillman R. H., Ellingson S. W., Brendler J. Practical Limits in the Sensitivity-Linearity Trade-off for Radio Telescope Front Ends in the HF and VHF-low Bands. *J. Astron. Instrum.* 2016. № 05. Is. 02. P. 1650004.

61. Ivashina M. V., Maaskant R., Woestenburger B. Equivalent System Representation to Model the Beam Sensitivity of Receiving Antenna Arrays. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2008. Is. 7. P. 733–737.
62. Belostotski L. No Noise Is Good Noise: Noise Matching, Noise Canceling, and Maybe a Bit of Both for Wide-Band LNAs. *IEEE Microw. Mag.* 2016. № 17. Is. 8. P. 28–40.
63. Warnick K. F., Jeffs B. D. Gain and Aperture Efficiency for a Reflector Antenna With an Array Feed. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2006. Is. 5. P. 499–502.
64. Warnick K. F., Jensen M. A. Optimal Noise Matching for Mutually Coupled Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2007. № 55. Is. 6, P. 1726–1731.
65. Warnick K. F., Jeffs B. D. Efficiencies and System Temperature for a Beamforming Array. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2008. Is. 7. P. 565–568.
66. Warnick K. F., Woestenburger B., Belostotski L., Russer P. Minimizing the Noise Penalty Due to Mutual Coupling for a Receiving Array. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2009. № 57. Is. 6. P. 1634–1644.
67. Warnick K. F., Ivashina M. V., Maaskant R., Woestenburger B. Unified Definitions of Efficiencies and System Noise Temperature for Receiving Antenna Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2010. № 58. Is. 6. P. 2121–2125.
68. Diao J., Warnick K. F. Antenna Loss and Receiving Efficiency for Mutually Coupled Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. № 65. Is. 11. P. 5871–5877.
69. Tillman R. H., Ellingson S. W. Active antennas for 20–90 MHz: Examples and practical limits. *Proc. of 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. 2013. P. 1266–1267.
70. Lee J. J. G/T and noise figure of active array antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1993. № 41. Is. 2. P. 241–244.
71. Milligan T. A. Modern Antenna Design. John Wiley & Sons, 2005.
72. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. Москва, 1975.

73. Taylor G. B., Carilli C. L., Perley R. A. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. *Synth. Imaging Radio Astron. II*. 1999. Is.180.
74. Сазонов Д. М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. Москва, 2015.
75. Токарский П. Л. Матричная модель диссипативной антенной решетки для расчета ее поляризационных характеристик. *Известия высших учебных заведений Радиоэлектроника*. 1996. Т. 39. №. 10. С. 10–18.
76. Бабак Л. И. Определение шумовых характеристик СВЧ-цепей. *Радиотехника и электроника*. 1980. Т. 25. № 11. С. 2380–2384.
77. Токарский П. Л. Матрица рассеяния антенной решетки с джоулевыми потерями в излучателях. *Известия высших учебных заведений Радиоэлектроника*. 1984. Т. 27. № 2. С. 81–83.
78. Bosma H. On the theory of linear noisy systems. Philips Research Laboratories, 1967.
79. Токарский П. Л. Применение волновых матриц для анализа шумов диссипативных антенных решеток. *Радиотехника. Всеукраинский межвед. научн.–техн. сборник*. 2001. Т. 122. С. 56–58.
80. Разевиг В. Д., Потапов Ю. В., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Москва. Солон-Пресс, 2003.
81. Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ. Москва. Высшая Школа, 1981.
82. Konovalenko A. A., Tokarsky P. L., Yerin S. N. The directivity characteristics of an antenna array receiving the UWB signal. *Proc. of the Vth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'10)*. 2010. P. 249–251.
83. Yerin S. N., Tokarsky P. L. Potential characteristics of subarray with discrete phase shifters for phased antenna array of GURT radio telescope. *Proc. of 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC 2013)*. 2013.

84. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., Yerin S. N. Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope. *Proc. of the VIIth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14)*. 2014, P. 25–29.
85. Yerin S. N., Tokarsky P. L. Matrix approach to estimation of phased antenna array efficiency placed near air-ground interface. *Proc. of the 12-th Kharkiv young scientists conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2012)*. 2012.
86. Tokarsky P. L., Yerin S. N. Mutual coupling between antennas used as array elements for a low frequency radio telescope. *Proc. of 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques*. 2013. P. 269–272.
87. Krymkin V. V. The spectrum of background low-frequency radio emission. *Radiophys. Quantum Electron*. 1971. № 14. Is. 2. P. 161–164.
88. Erickson B. *Integration Times*, 23, 2005.
89. Konovalenko A., Tokarsky P., Bubnov I., Yerin S.. SNRs of two active antenna designs: Inverted V vs horizontal dipole. *Proc. of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. 2017. P. 224–227.
90. Konovalenko A., Tokarsky P., Yerin S. Effect of the ground screen on sensitivity of low-frequency radio telescope array element. *Proc. of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. 2017. P.186–189.
91. Tokarsky P. L., Yerin S. N. A multiport approach to modelling of phased antenna array for radio astronomy. *Proc. of 2013 European Microwave Conference*. 2013. P. 1651–1654.
92. NEC based antenna modeler and optimizer», 4nec2 – NEC based antenna modeler and optimizer. [Online]. URL: <http://www.qsl.net/4nec2>. (Дата звернення: 28.10.2019).
93. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н. Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20. № 2. С. 142.

94. Tokarsky P. L., Yerin S. N. Accurate analysis of subarray characteristics for GURT low-frequency radio telescope. *Proc. of the 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014)*. 2014.
95. Yerin S. N., Tokarsky P. L. Mutual Coupling Between Antennas Used as Elements of a Phased Antenna Array for the Decametric Wave Radio Telescope. *Telecommun. Radio Eng.* 2016. № 75. Is. 4.
96. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N. Sensitivity of an active antenna array element for the low-frequency radio telescope GURT. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. № 65. Is. 9. P. 4636–4644.
97. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21. № 1. С. 48.
98. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. Шумовая температура активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23. № 1. С. 43.
99. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Falkovich I. S. Yerin S. N. SNR in active receiving antenna used as an element of phased antenna array for GURT radio telescope. *Proc. of 2015 European Radar Conference (EuRAD)*. 2015. P. 572–575.
100. Yerin S., Tokarsky P., Bubnov I., Konovalenko A. Variation of phasing system parameters of GURT active antenna subarray in a wide scan range. *Proc. of 2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*. 2015. P. 1–2.
101. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N. SNR of a subarray of GURT radio telescope. *Proc. of 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*. 2016. P. 217–220.

102. Braude S. Y. et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky: XIIIa. The catalogue of sources in declination range $+30^\circ$ to $+40^\circ$. *Astrophys. Space Sci.* 2002. № 280. Is. 3. P. 235–299.
103. Gower J. F. R., Scott P. F., Wills D. A survey of radio sources in the declination ranges -07° to 20° and 40° to 80° . *Mem. R. Astron. Soc.* 1967. Is. 71, P. 49.
104. Litvinenko G. V. et al. Modulation structures in the dynamic spectra of Jovian radio emission obtained with high time-frequency resolution. *Astron. Astrophys.* 2009. № 493. Is. 2. P. 651–660.
105. Melnik V. N. et al. Decameter Type IV Burst Associated with a Behind-the-limb CME Observed on 7 November 2013. *Sol. Phys.* 2018. № 293. Is. 3. P. 53.
106. Shevchuk N. V. et al. The Storm of Decameter Spikes During the Event of 14 June 2012. *Sol. Phys.* 2016. № 291. Is. 1. C. 211–228.
107. Vasilenko N. M., Sidorchuk M. A. Separation of galactic and extragalactic radio emission at decameter wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* № 362. Is. 12. P. 221.
108. Konovalenko A. A. et al. Multi-telescope synergy in the low-frequency radio astronomy for the solar, planetary and heliospheric studies. *Proc. of U.R.S.I. Landesausschuss in der Bundesrepublik Deutschland e.V. Kleinheubacher Tagung*, 2015.
109. Dididze G. et al. Comparative analysis of solar radio bursts before and during CME propagation. *Astron. Astrophys.* 2019. Is. 625. P. A63.
110. Aschwanden M. J., Bastian T. S., Benz A. O., Brosius J. W. Decimetric Solar Type U Bursts: VLA and PHOENIX Observations. *Astrophys. J.* 1992. Is. 391. P. 380.
111. Fokker A. D. Trajectories followed by U-like solar radio bursts. *Sol. Phys.* 1970. Vol. 11. Is. 1. P. 92–103.
112. Allen C. W. Interpretation of Electron Densities from Corona Brightness. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1947. № 107. Is. 5–6. P. 426–432.

113. Доровский В. В. и др. Наблюдения солнечного U-всплеска в полосе частот 10–70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18. №. 2. С. 101.
114. Stanislavsky A. A. et al. Solar bursts as can be observed from the lunar farside with a single antenna at very low frequencies. *Astron. Nachrichten*. 2018. № 339. Is. 7–8. P. 559–570.
115. Shkuratov Y. G. et al. A twofold mission to the Moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut*. 2019. Is. 154. P. 214–226.
116. Zarka P. et al. Jupiter radio emission induced by Ganymede and consequences for the radio detection of exoplanets. *Astron. Astrophys*. 2018. Is. 618, P. A84.
117. Cecconi B. et al. Juno-ground-radio observations support. *Proc. of 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions*. 2018.
118. Konovalenko A. et al. State-of-the-art of low frequency radio astronomy, relevant antenna systems and international cooperation in Ukraine. *Proc. of 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. 2015. P. 1–5.
119. Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H., Scott P. F., Collins R. A. Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*. 1968. № 217. Is. 5130. P. 709–713.
120. Abbott B. P. et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett*. 2016. № 116. Is. 6. P. 061102.
121. D. R. Lorimer, M. Kramer, Handbook of Pulsar Astronomy. 2004.
122. D. C. Backer, S. Hama, S. Van Hook, R. S. Foster, «Temporal variations of pulsar dispersion measures», *Astrophys. J*. 1993. Is. 404. P. 636–642.
123. Williamson I. P. Pulse broadening due to multiple scattering in the interstellar medium. *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 1972. № 157. Is. 1. P. 55–71.

124. Williamson I. P., Scheuer P. A. G. Pulse Broadening Due to Multiple Scattering in the Interstellar Medium—II. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1973. № 163. Is. 4. P. 345–356.

125. Williamson I. P., Scheuer P. A. G. Pulse Broadening Due to Multiple Scattering in the Interstellar Medium—III. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1974. № 166. Is. 3. P. 499–512.

126. Smith F. G. Measurement of the Interstellar Magnetic Field. Pulsating Stars: A NATURE Reprint. F. G. Smith, A. Hewish, Ed. Boston, MA: Springer US, 1968, P. 89–90.

127. Zakharenko V. V. et al. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. № 431. Is. 4. P. 3624–3641.

128. Malofeev V. M. et al. Spectra of 45 pulsars. *Astron. Astrophys.* 1994. Is. 285. P. 201–208.

129. Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., Hobbs M. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* 2005. № 129. Is. 4. P. 1993–2006.

130. The ATNF Pulsar Database. [Online]. URL: <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>. (Дата звернення: 28.10.2019).

131. Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Plakhov M. S., Ulyanova O. O. Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. № 455. Is. 1. P. 150–157.

132. Скорик А. А. и др. Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 2. С. 93–111.

133. Cordes J. M., Observational limits on the location of pulsar emission regions. *Astrophys. J.* 1978. Is. 222. P. 1006–1011.

134. Zakharenko V., Yerin S., Bubnov I., Vasilieva I., Kravtsov I. Using of pulsar spectra catalogue at frequencies below 80 MHz for astronomical calibration

of phased antenna arrays. *Proc. of 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2016. P. 210–213.

135. Tan C. M. et al. LOFAR Discovery of a 23.5 s Radio Pulsar. *Astrophys. J.* 2018. № 866. Is. 1. P. 54.

136. Захаренко В. В. и др. Исследования радиоизлучения пульсаров с помощью секции радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23. № 3. С. 147.

137. Izvekova V. A., Kuzmin A. D., Malofeev V. M., Shitov Yu. P. Radio spectra of pulsars. *Astrophys. Space Sci.* 1981. № 78. Is. 1. P. 45–72.

138. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н., Ерин С. Н. Влияние сезонных вариаций параметров грунта на чувствительность элемента активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 24. № 4. С. 233.

139. Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Seredkina A. A. Data processing pipeline for decameter pulsar/transient survey. *Odessa Astron. Publ.* 2013. Is. 26, № 2. P. 159–161.

140. Malofeev V. M., Malov O. I., Shchegoleva N. V. Flux densities of 235 pulsars at 102.5 MHz. *Astron. Rep.* 2000. № 44. Is. 7. С. 436–445.

ДОДАТОК А

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Бубнов И. Н., Гридин А. А., Шевчук Н. В., Фалькович И. С., Коваль А. А., Руткевич Б. П., Резник А. П., Рукер Х. О., Панченко М., Белов А. С., Христенко А. Д., Квасов Г. В., **Ерин С. Н.** Наблюдения солнечного U-всплеска в полосе частот 10–70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18. № 2. С. 101–106. (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на субрешиці радіотелескопа ГУРТ).
2. **Ерин С. Н.**, Токарский П. Л., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Резник А. П. Диаграммообразующий модуль для секции антенной решетки радиотелескопа ГУРТ декаметрового и метрового диапазонов волн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19. № 3. С. 240–248. DOI: 10.15407/rpra19.03.240 (Особистий внесок здобувача: проведення вимірювань характеристик діаграмотворного модуля, обробка отриманих даних, написання тексту статті).
3. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.** Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20. № 2. С. 142–153. DOI: 10.15407/rpra20.02.142 (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання антенної решітки, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання тексту статті).
4. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21. № 1. С. 48–57. DOI: 10.15407/rpra21.01.048 (Особистий внесок здобувача: проведення

електродинамічного моделювання, вимірювання шумових характеристик антенного елемента, обробка даних, написання тексту статті).

5. Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. *Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. Радиофизика и радиоастрономия.* 2016. Т. 21. №. 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083 (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на субрешитках радіотелескопа ГУРТ, обробка даних, створення програм візуалізації і обробки даних, написання тексту статті*).
6. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н.. *Шумовая температура активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. Радиофизика и радиоастрономия.* 2018. Т. 23. № 1. С. 43–59. DOI: 10.15407/rpra23.01.043 (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання структури субрешитки, проведення вимірювань шумових характеристик антенної решітки, обробка даних, створенні програм обробки даних, написання тексту статті*).
7. Захаренко В. В., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н., Васильева Я. Ю., Ульянов О. М., Яцына В. Ю. *Исследования радиоизлучения пульсаров с помощью секции радиотелескопа ГУРТ. Радиофизика и радиоастрономия.* Т. 23. №. 3. С. 147–165. DOI: 10.15407/rpra23.03.147 (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешитках радіотелескопа ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання тексту статті*).

Наукові праці в зарубіжних наукових фахових виданнях:

8. Tokarsky P., Konovalenko A., **Yerin S.** Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65. Is. 9. P. 4636–4644. DOI: 10.1109/TAP.2017.2730238 (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, вимірювання шумових характеристик субрешиїтки ГУРТ, написання тексту статті).
9. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Mutual coupling between antennas used as elements of a phased antenna array for the decametric wave radio telescope. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75. No. 4. P. 285–295. (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у створенні програм обробки даних, написання тексту статті).
10. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., **Yerin S.**, Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Experimental Astronomy*. 2016. Vol. 42. Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x (Особистий

внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субреши́тках ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту статті).

11. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V., Bubnov I., **Yerin S.**, Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskyi Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2016. Vol. 05. Is. 04. P. 1641010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2251171716410105> (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субреши́тках ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту статті).*

***Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації
(тези доповідей на наукових конференціях):***

12. Konovalenko A. A., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** The directivity characteristics of an antenna array receiving the UWB signal. Proc. of the Vth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'10), Sevastopol, Ukraine, 2010, P. 249–251. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті).*

13. **Yerin S. N.**, Gridin A. A., Tokarsky P. L. Phase shifter for antenna array of decameter range radio telescope. Proc. of the 19th Intern. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012, Warsaw, Poland, 2012, P. 715–717. (*Особистий внесок здобувача: проведення вимірювань характеристик фазообертачів, участь у розробці моделі, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті*).
14. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Gridin A. A., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** UWB active antenna array for low frequency radio astronomy. Proc. of the VIth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), Sevastopol, Ukraine, 2012, P. 39–43. (*Особистий внесок здобувача: участь у моделюванні характеристик субрешилки ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту конференційної статті*).
15. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Matrix approach to estimation of phased antenna array efficiency placed near air-ground interface. Proc. of the 12-th Kharkiv young scientists conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2012), Kharkiv, Ukraine, 2012. (*Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у написанні тексту конференційної статті*).
16. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Mutual coupling between antennas used as array elements of a low frequency radio telescope. Proc. of the Intern. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), Odesa, Ukraine, 2013, pp. 269–272. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у написанні тексту статті*).
17. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** A multiport approach to modelling of phased antenna array for radio astronomy. Proc. of 43rd European Microwave Conference (EuMC 2013), Nuremberg, Germany, 2013, P. 1651–1654. (*Особистий внесок здобувача: участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту конференційної статті*).

18. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Potential characteristics of subarray with discrete phase shifters for phased antenna array of GURT radio telescope. Proc. of 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC 2013), Kharkiv, Ukraine, 2013. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, участь в написанні тексту тез доповіді*).
19. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope. Proc. of the VIIth Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14), Kharkiv, Ukraine, 2014, P. 25–29. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті*).
20. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Accurate analysis of subarray characteristics for GURT low-frequency radio telescope. Proc. of the 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014), Kharkiv, Ukraine, 2014. (*Особистий внесок здобувача: участь у розробці моделі та методики розрахунків, обробка даних, участь в написанні тексту конференційної статті*).
21. Konovalenko A., Zarka P., Sodin L., Zakharenko V., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Stanislavsky A., Kalinichenko N., Koliadin V., Melnik V., Dorovsky V., Shepelev V., Koval A., Bubnov I., **Yerin S.**, Vasylieva I., Gridin A., Kulishenko V., Reznik A., Reznichenko A., Kvasov G., Mukha D., Khristenko A., Litvinenko G., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Ryabov V., Mann G., Brazhenko A., Koshovyy V. State-of-the-art of low frequency radio astronomy, relevant antenna systems and international cooperation in Ukraine. Proc. of the Xth International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), Kharkiv, Ukraine, 2015, P. 8–12. (*Особистий внесок здобувача: підготовка*

допоміжних матеріалів та ілюстрацій, участь в написанні тексту конференційної статті).

22. **Yerin S. N.**, Konovalenko A. A., Khristenko A. D., Gridin A. A., Reznik A. P., Kvasov G. V. Signal delivery system in a subarray of Giant Ukrainian Radio Telescope. Proc. of the Xth International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), Kharkiv, Ukraine, 2015, P. 190–192. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні вимірювань характеристик субреши́тки ГУРТ, обробка даних, написання тексту конференційної статті*).
23. Konovalenko A., Zarka P., Rucker H. O., Mann G., Zakharenko V., Ulyanov O., Melnik V., Kalinichenko N., Panchenko M., Stanislavskiy A., Litvinenko G., Sidorchuk M., Stepkin S., Kolyadin V., Tokarskiy P., **Yerin S.**, Bubnov I., Brazhenko A. Multi-telescope synergy in the low-frequency radio astronomy for the solar, planetary and heliospheric studies. U.R.S.I. Landesausschuss in der Bundesrepublik Deutschland e.V. Kleinheubacher Tagung 2015 Miltenberg, Germany, 2015. (*Особистий внесок здобувача: участь у спостереженнях на радіотелескопі УТР-2 та ГУРТ, участь у підготовці доповіді*).
24. **Yerin S.**, Tokarsky P., Bubnov I., Konovalenko A. Variation of phasing system parameters of GURT active antenna subarray in a wide scan range. Proc. of International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2015), Dnipropetrovsk, Ukraine, 2015, P. RAA-1. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у написанні тексту конференційної статті*).
25. Zakharenko V., **Yerin S.**, Bubnov I., Vasilieva I., Kravtsov I. Using of pulsar spectra catalogue at frequencies below 80 MHz for astronomical calibration of phased antenna arrays. Proc. of International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF 2016), Kharkiv, Ukraine, 2016, P. RAA-5. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на*

радіотелескопі УТР-2 та субрешітці ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання тексту статті).

26. Cecconi B., Zarka P., Savalle R., Le Sidaner P., Coffre A., Denis L., Viou C., Konovalenko A. A., Skoryk A., **Yerin S.**, Kasaba Y., Kumamoto A., Misawa H., Tsuchiya T., Hobara Y., Nakajo T., Imai K., Ryabov V., Rothkaehl H., Orton G. S., Momary T., Griessmeier J.-M., Imai M., Girard J. N., Lamy L., Anderson M., André N., Génot V., Ebert R., Carozzi T., Kimura T., Kurth W. S., Higgins C. A., Mugler J. L., Typinsky D., Clarke T., Sky J., Flagg R., Reyes F., Greenman W., Brown J., Mount A., Ashcraft T., Thieman J., Reeve W., Fung S., Towne N., King T., Bolton S. Juno-ground-radio observation support. Proc. of 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII), Graz, Austria, October 25–27, 2016. P. 28. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешітці ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки та бази даних спостережень).*
27. Konovalenko A., Tokarsky P., Bubnov I., **Yerin S.** SNRs of two active antenna designs: Inverted V vs horizontal dipole. Proc. of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kyiv, Ukraine, 2017. P. 224-227. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972627. *(Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, участь у обробці даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні тексту конференційної статті).*
28. Konovalenko A., Tokarsky P., **Yerin S.** Effect of the ground screen on sensitivity of low-frequency radio telescope array element. Proc. of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, 2017. P. 186–189. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972617 *(Особистий внесок здобувача: участь у обробці даних, участь у створенні програм обробки, участь в написанні тексту конференційної статті).*